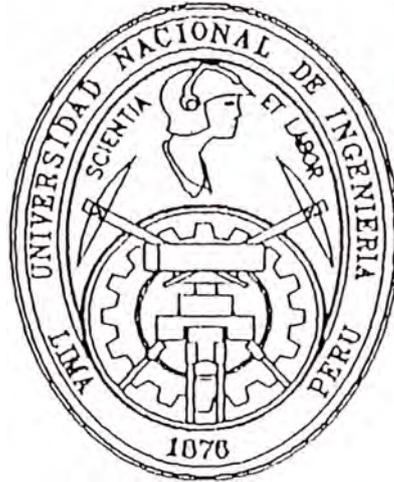


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO**



**DESARROLLO Y APLICACION DE PROGRAMAS  
DE COMPUTADORA PARA HIDRAULICA  
DE PERFORACION Y CEMENTACION DE POZOS**

**TITULACION POR EXAMEN PROFESIONAL  
PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO DE PETROLEO**

**ANDRES AUGUSTO SALAS CORREA  
PROMOCION 1979-I**

**LIMA-PERU  
1996**

# **DESARROLLO Y APLICACION DE PROGRAMAS DE COMPUTADORA PARA HIDRAULICA DE PERFORACION Y CEMENTACION DE POZOS**

## **TEMARIO**

### **1. SUMARIO DE LOS TRABAJOS**

- 1.1.** Programa para diseñar hidráulica de perforación para fluido Bingham
- 1.2.** Programa para determinar diámetros óptimos de boquillas de broca
- 1.3.** Programa para calcular propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento

### **2. REOLOGIA DE FLUIDOS**

#### **2.1. Definición de reología y fluido**

**2.1.1.** Reología

**2.1.2.** Fluido

#### **2.2. Tipos de flujo de fluidos**

**2.2.1.** Flujo tapón

**2.2.2.** Flujo laminar

**2.2.3.** Flujo turbulento

#### **2.3. Características fundamentales de fluidos**

**2.3.1.** Velocidad de corte

**2.3.2.** Esfuerzo de corte

#### **2.4. Modelos reológicos de fluidos**

**2.4.1.** Fluidos Newtonianos

## **2.4.2. Fluidos No-Newtonianos**

### **2.4.2.1. Fluidos Plástico Bingham**

### **2.4.2.2. Fluidos Ley de Potencia**

### **2.4.2.3. Otros modelos de fluidos**

### **2.4.2.4. Comportamiento dependiente del tiempo**

## **2.5. Viscosímetro cilíndrico concéntrico rotacional**

### **2.5.1. Principio fundamental**

### **2.5.2. Dimensiones y modelos de velocidades**

#### **2.5.2.1. Dimensiones**

#### **2.5.2.2. Modelos de velocidades**

### **2.5.3. Resolución matemática**

### **2.5.4. Relaciones para velocidad de corte y esfuerzo de corte del fluido**

## **2.6. Método de mínimos cuadrados**

### **2.6.1. Coeficiente de correlación**

### **2.6.2. Pendiente de la recta**

### **2.6.3. Intercepción con eje de ordenadas**

## **3. PROGRAMA PARA DISEÑAR HIDRAULICA DE PERFORACION PARA FLUIDO BINGHAM**

### **3.1. Sumario del trabajo**

### **3.2. Optimización de perforación de pozos**

#### **3.2.1. Variables de optimización de perforación**

#### **3.2.2. Fluidos de perforación**

##### **3.2.2.1. Definición**

##### **3.2.2.2. Funciones**

- 3.2.3. Importancia de reología de fluidos
- 3.2.4. Flujo laminar en tuberías y espacios anulares
- 3.2.5. Importancia de hidráulica de perforación

### 3.3. Métodos de optimización de hidráulica de perforación

- 3.3.1. Máxima potencia hidráulica en la broca con presión constante en superficie
- 3.3.2. Máxima fuerza de impacto con presión constante en superficie
- 3.3.3. Máxima fuerza de impacto con potencia hidráulica constante en superficie
- 3.3.4. Recomendaciones para prácticas de optimización

### 3.4. Desarrollo del programa de computadora

- 3.4.1. Fórmulas empleadas
- 3.4.2. Datos requeridos
- 3.4.3. Descripción de los algoritmos de cálculo
- 3.4.4. Resultados obtenidos

### 3.5. Resultados de ejemplo de aplicación del programa

## 4. PROGRAMA PARA DETERMINAR DIAMETROS OPTIMOS DE BOQUILLAS DE BROCA

- 4.1. Sumario del trabajo
- 4.2. Antecedentes de métodos de optimización de hidráulica
- 4.3. Determinación de parámetros de ecuación  $P_c = kQ_u$ 
  - 4.3.1. Antecedentes de técnicas de cálculo
  - 4.3.2. Aplicación de método de mínimos cuadrados
- 4.4. Desarrollo del programa de computadora

- 4.4.1. Fórmulas empleadas
- 4.4.2. Datos requeridos
- 4.4.3. Descripción de los algoritmos de cálculo
- 4.4.4. Resultados obtenidos

4.5. Resultados de ejemplo de aplicación del programa

## **5. PROGRAMA PARA CALCULAR PROPIEDADES REOLOGICAS Y CAUDAL CRITICO DE LECHADAS DE CEMENTO**

5.1. Sumario del trabajo

5.2. Fundamentos de cementación

5.2.1. Proceso de cementación

5.2.2. Manufactura y química del cemento

5.2.2.1. Manufactura

5.2.2.2. Química

5.2.3. Clasificación y propiedades de cementos

5.2.3.1. Clasificación

5.2.3.2. Propiedades

5.2.4. Aditivos de cementación

5.2.5. Factores para diseño de lechadas de cemento

5.3. Importancia de cementación primaria de tuberías

5.3.1. Factores para planificar trabajos de cementación

5.3.2. Problemas ocasionados por deficientes trabajos de cementación

5.3.3. Factores que contribuyen en deficientes trabajos de cementación

5.4. Optimización de cementación primaria de tuberías

- 5.4.1.** Importancia de hidráulica de cementación primaria de tuberías
- 5.4.2.** Teorías de desplazamiento del fluido de perforación
- 5.4.3.** Razones para un buen trabajo de cementación
- 5.4.4.** Factores que afectan los resultados de trabajos de cementación

- 5.4.4.1.** Condiciones del fluido de perforación
- 5.4.4.2.** Movimiento de la tubería
- 5.4.4.3.** Centralización de la tubería
- 5.4.4.4.** Caudal de flujo
- 5.4.4.5.** Cantidad de fluidos de desplazamiento
- 5.4.4.6.** Diferencia de densidades
- 5.4.4.7.** Fluidos espaciadores

## **5.5.** Aplicaciones de reología a lechadas de cemento

- 5.5.1.** Regresión lineal de datos de velocidad de corte y esfuerzo de corte del fluido
  - 5.5.1.1.** Modelo de fluido Plástico Bingham
  - 5.5.1.2.** Modelo de fluido Ley de Potencia

## **5.6.** Desarrollo del programa de computadora

- 5.6.1.** Método de cálculo establecido por el Instituto Americano de Petróleo
- 5.6.2.** Fórmulas empleadas
  - 5.6.2.1.** Modelo de fluido Plástico Bingham
  - 5.6.2.2.** Modelo de fluido Ley de Potencia
- 5.6.3.** Datos requeridos
- 5.6.4.** Descripción de los algoritmos de cálculo
- 5.6.5.** Resultados obtenidos

## **5.7.** Resultados de ejemplo de aplicación del programa

## **6. CONCLUSIONES**

- 6.1.** Programa para diseñar hidráulica de perforación para fluido Plástico Bingham
- 6.2.** Programa para determinar diámetros óptimos de boquillas de broca
- 6.3.** Programa para calcular propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento

## **7. RECOMENDACIONES**

- 7.1.** Programa para diseñar hidráulica de perforación para fluido Plástico Bingham
- 7.2.** Programa para determinar diámetros óptimos de boquillas de broca
- 7.3.** Programa para calcular propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento

## **8. LISTADOS DE LOS PROGRAMAS**

- 8.1.** Listado del programa para diseñar hidráulica de perforación para fluido Plástico Bingham
- 8.2.** Listado del programa para determinar diámetros óptimos de boquillas de broca
- 8.3.** Listado del programa para calcular propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento

## **9. ANEXOS**

## **1. SUMARIO DE LOS TRABAJOS**

El presente trabajo denominado "**DESARROLLO Y APLICACION DE PROGRAMAS DE COMPUTADORA PARA HIDRAULICA DE PERFORACION Y CEMENTACION DE POZOS**" presenta tres programas elaborados en lenguaje BASIC para hidráulica de perforación y cementación primaria de tuberías de revestimiento de pozos :

- Programa para diseñar hidráulica de perforación para fluido Plástico Bingham
- Programa para calcular diámetros óptimos de boquillas de broca
- Programa para calcular propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento

El primer programa diseña la hidráulica de perforación para un pozo próximo a ser perforado, el segundo programa calcula los diámetros óptimos de boquillas de broca para un pozo en perforación y el tercer programa determina propiedades reológicas y caudal crítico de flujo turbulento de lechadas de cemento para cementación primaria de tuberías.

Dichos programas fueron empleados de manera intermitente en las operaciones de perforación y cementación de pozos de PETROPERU en Selva entre 1992 y 1996, debido a que todavía se encontraban en prueba y a deficiencias de comunicación entre las operaciones de campo y la oficina de ingeniería.

Se pretende destacar que el personal de ingeniería que trabaja en diseño y supervisión de perforación y cementación de pozos podría elaborar programas para microcomputadora sin gráficos complicados y obtener los mismos resultados básicos, de manera que podría efectuar los diseños de trabajos sin tener que depender de los programas sofisticados de las compañías de fluidos de perforación, brocas y cementación.

La aplicación de programas de computadora permite descartar errores de diseño y reducir los tiempos que se emplean en preparar las recomendaciones de hidráulica de perforación, parámetros de peso sobre la broca y velocidad de rotación, y en calcular el caudal crítico de flujo turbulento de lechadas de cemento para cementación primaria de tuberías.

Fundamentalmente el uso de programas de computadora mejora el grado de confiabilidad de diseños y permite aumentar la posibilidad de obtener resultados positivos de tra-

bajos, contribuyendo a incrementar la eficiencia y reducir los costos de perforación y cementación de pozos, principales objetivos de los ingenieros de perforación.

La elaboración de otros programas permitiría acelerar el desarrollo de conocimientos teóricos avanzados de ingeniería de perforación y de aplicaciones prácticas. Las posibilidades son amplias al respecto, ya que es posible elaborar programas para diversos trabajos de perforación y cementación de pozos.

En la mayoría de estos trabajos las compañías de servicios han desarrollado paquetes integrales de programas de computadora para diseño e instrumentos electrónicos para controlar diversos parámetros de dichos trabajos, que demuestran el alto nivel y complejidad de las aplicaciones de informática y electrónica en perforación y cementación.

El objetivo no es competir con los programas sofisticados de las compañías de servicios; sin embargo, la elaboración de programas básicos proporciona al ingeniero conocimientos teóricos avanzados que son fundamentales para una mejor supervisión y control de calidad de servicios prestados, que finalmente contribuye a mejorar el nivel de eficiencia de las operaciones de perforación y cementación de pozos.

### **1.1. PROGRAMA PARA DISEÑAR HIDRAULICA DE PERFORACION PARA FLUIDO BINGHAM**

Optimizar la hidráulica de perforación implica determinar la caída óptima de presión en la broca y el caudal óptimo de circulación en función del exponente  $u$  de la ecuación  $P_c = kQ^u$  de pérdidas de presión por fricción del sistema de circulación excluida la broca.

El programa diseña la hidráulica de perforación para el modelo de fluido Bingham mediante las relaciones matemáticas de optimización demostradas por Kendall-Goins<sup>7</sup>-Robinson<sup>11</sup> y con el valor del exponente  $u$  de la ecuación  $P_c = kQ^u$ , asumido de 1.86 ó determinado mediante regresión lineal por otro programa.

Para cada método de optimización de hidráulica se determinan los siguientes parámetros

- Caudal óptimo de flujo de lodo
- Pérdida óptima de presión en la broca

- Diámetros de boquillas
- Caída de presión en la broca
- Fuerza de impacto en el fondo del hueco
- Potencia hidráulica y energía específica en la broca
- Densidad equivalente de circulación
- Número de Reynolds del fluido para el caudal óptimo de flujo
- Número de Reynolds Crítico en el espacio anular entre el hueco y la tubería pesada

## **1.2. PROGRAMA PARA DETERMINAR DIAMETROS OPTIMOS DE BOQUILLAS DE BROCA**

Este programa mediante regresión lineal en coordenadas logarítmicas de caudales y presiones reducidas determina el exponente  $u$  de la ecuación  $P_c = kQ^u$  de pérdidas de presión en el sistema de circulación excluida la broca. El exponente  $u$  es la pendiente de la recta de regresión lineal de  $\log(P_c) - \log(Q)$ .

Mediante dicho exponente  $u$  y las relaciones matemáticas de optimización demostradas por Kendall <sup>7</sup> y Robinson <sup>11</sup> se calcula la hidráulica óptima para un pozo en perforación.

Para cada método de optimización de hidráulica se determinan los siguientes parámetros

- Factor de optimización
- Pérdida de presión en la broca
- Caudal óptimo de circulación de lodo
- Diámetros de boquillas
- Fuerza de impacto en el fondo del hueco
- Potencia hidráulica y energía específica en la broca

## **1.3. PROGRAMA PARA CALCULAR PROPIEDADES REOLOGICAS Y CAUDAL CRITICO DE LECHADAS DE CEMENTO**

Con este programa los datos de velocidades de corte y esfuerzos de corte de la lechada

de cemento son sometidos a regresión lineal en coordenadas cartesianas y logarítmicas para obtener la pendiente **a** e intercepción **b** de la ecuación de regresión  $y=ax+b$  para los modelos de fluido Plástico Bingham y Ley de Potencia. <sup>2-14</sup>

Con dichas regresiones matemáticas se calculan

- Coeficientes de correlación
- Viscosidad plástica
- Punto de cedencia
- Índice de comportamiento de flujo
- Índice de consistencia

Luego se determinan los siguientes parámetros para la lechada de cemento en el espacio anular entre el hueco y la tubería :

- Número de Reynolds Crítico, caudal crítico y velocidad equivalente de corte para flujo turbulento
- Número de Reynolds Crítico, caudal crítico y velocidad equivalente de corte para flujo tapón

## **2. REOLOGIA DE FLUIDOS**

### **2.1. DEFINICION DE REOLOGIA Y FLUIDO**

#### **2.1.1. REOLOGIA**

La palabra reología se deriva de las palabras griegas RHEO y LOGI, que significan flujo y ciencia. La reología es la ciencia de la deformación y flujo de sólidos, líquidos y gases. <sup>5</sup>

Cuando una fuerza es aplicada a un cuerpo le produce una deformación. En el caso de un sólido esta deformación puede ser elástica si el cuerpo regresa a su estado original tan pronto como la fuerza es liberada, o plástica si el cuerpo regresa a su estado original bajo la acción de otras fuerzas. En el caso de un fluido la fuerza aplicada induce al flujo. <sup>2</sup>

#### **2.1.2. FLUIDO**

Un fluido es un cuerpo que se deforma continuamente cuando se somete a una tensión de corte, deformación que se conoce como velocidad de corte. La viscosidad es la fricción interna generada por un fluido cuando una fuerza externa es aplicada para causar flujo. Esta fricción interna es resultado de las fuerzas de atracción entre las moléculas del fluido y se conoce como esfuerzo de corte. La relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte define el comportamiento de flujo de un fluido. <sup>1-2-5</sup>

El estudio de modelos matemáticos de reología de fluidos permite evaluar las propiedades de flujo de fluidos de perforación y lechadas de cemento. Las propiedades reológicas de estos fluidos son importantes por sus efectos en

- Pérdidas de presión por fricción en la tubería y en el espacio anular entre hueco y tubería
- Densidad equivalente de circulación
- Presiones de surgencia y succión en las operaciones de bajar y reciprocación la tubería

- Pérdidas de presión en la broca
- Optimización de la hidráulica de perforación
- Optimización de la eficiencia de remoción del lodo por cemento en cementación primaria de tuberías

## **2.2. TIPOS DE FLUJO DE FLUIDOS**

Flujo es el movimiento de un fluido que se produce por la aplicación de una fuerza externa de cortadura.

Todas las situaciones de flujo están sometidas a los principios fundamentales siguientes: <sup>6</sup>

- Los principios de Newton del movimiento se deben cumplir para toda partícula y en cualquier tiempo
- Ley de conservación de masa (ecuación de continuidad)
- El primero y segundo principios de la termodinámica
- Condiciones de contorno, enunciados analíticos que dicen que un fluido real tiene velocidad cero respecto a un contorno en un contorno
- Pueden intervenir otras relaciones, tales como una ecuación de estado o la ecuación de Newton de la viscosidad

El flujo permanente es aquel en el cual las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo. En este tipo de flujo no hay cambios de velocidad, densidad, presión, temperatura para un mismo punto del fluido de coordenadas (x,y,z).

El flujo permanente puede ser de los siguientes tipos : tapón, laminar, turbulento <sup>1</sup>

### **2.2.1. FLUJO TAPON**

En este tipo de flujo el perfil de distribución de velocidades es plano a través del área perpendicular a la dirección de flujo, resultando que la mayor parte del fluido se desplaza a velocidad uniforme. El flujo tapón ocurre a muy bajos caudales de flujo y en fluidos con

altas propiedades reológicas.

Este tipo de flujo se considera en trabajos de cementación primaria de tuberías cuando la densidad equivalente de circulación en flujo turbulento o laminar puede exceder el límite de gradiente de fractura de formación.

### **2.2.2. FLUJO LAMINAR**

En flujo laminar cada capa de fluido se desplaza a lo largo de trayectorias lisas en dirección paralela al flujo a una velocidad determinada, sin intercambio de masa de fluido entre las capas. En este flujo se cumple la ley de Newton de la viscosidad que relaciona esfuerzo de corte con velocidad de corte, características que están definidas para dos capas de fluido que se deslizan en direcciones paralelas.

En flujo laminar de un fluido Newtoniano en una tubería el perfil de distribución de velocidades es parabólico a través del área perpendicular a la dirección de flujo, la velocidad de flujo es cero en la pared de la tubería y máxima en el centro. Además, la velocidad de corte y el esfuerzo de corte son máximos en la pared y cero en el centro de la tubería.

### **2.2.3 FLUJO TURBULENTO**

En este tipo de flujo las partículas de fluido se mueven siguiendo trayectorias muy irregulares, originando intercambios de cantidad de movimiento de una porción de fluido a otra. En general todas las partículas de corriente se mueven a velocidad resultante igual.

Debido a ese movimiento caótico de las partículas de fluido, sólo muy cerca de las paredes existe una delgada capa con velocidad de corte y esfuerzo de corte ordenados. La gradiente de velocidad es muy alta cerca de las paredes, pero el perfil de distribución de velocidades es aplanado.

Debido a que existe muy poco corte ordenado (velocidad y esfuerzo) en flujo turbulento, los viscosímetros rotacionales están diseñados para evaluar las propiedades reológicas de fluidos sólo en flujo laminar.

## **2.3. CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DE FLUIDOS**

El movimiento de un fluido se produce por la aplicación de una fuerza externa de cortadura. Los conceptos de esfuerzo de corte y velocidad de corte están definidos para dos capas de fluido que se deslizan en direcciones paralelas sin intercambio de masa de fluido entre las capas.

Para condiciones de presión y temperatura constantes, el comportamiento de un fluido en flujo laminar puede ser descrito mediante una relación matemática entre velocidad de corte y esfuerzo de corte. Estos conceptos y sus mediciones permiten el estudio matemático del flujo de fluidos y su aplicación a fluidos de perforación y lechadas de cemento.<sup>1-2</sup>

### **2.3.1. VELOCIDAD DE CORTE**

La velocidad de corte es la diferencia de velocidades entre dos capas adyacentes de un fluido dividida por la distancia de separación de esas dos capas

$$V = \frac{dV}{dr}$$

Donde :

- **dV** es diferencia de velocidades entre dos capas adyacentes
- **dr** es distancia entre esas dos capas

La velocidad de corte también se denomina gradiente de velocidad o velocidad angular de deformación del fluido. La velocidad de corte está relacionada a caudal de flujo.

### **2.3.2. ESFUERZO DE CORTE**

El esfuerzo de corte es la fuerza cortante por unidad de área de la capa laminar inducida al flujo :

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{A}}$$

Donde :

- **F** es fuerza cortante
- **A** es área sobre la que actúa la fuerza **F**
- **t** es tensión media de corte

Una fuerza cortante es la componente tangencial a la superficie sobre la que actúa la fuerza. La fuerza cortante dividida entre el área es la tensión de cortadura media. El esfuerzo de corte está relacionado a pérdidas de presión fluyente.

## **2.4. MODELOS REOLOGICOS DE FLUIDOS**

Un modelo de fluido describe el comportamiento de flujo de un fluido mediante una ecuación matemática entre velocidad de corte y esfuerzo de corte. Para el modelo de fluido Newtoniano la relación de esfuerzo de corte a velocidad de corte es constante. Para fluidos No-Newtonianos la relación entre esfuerzo y velocidad de corte es más compleja. <sup>1-2-3</sup>

Una relación generalizada para todos los fluidos No-Newtonianos no ha sido encontrada, pero varios modelos se han propuesto para describir el comportamiento de algunos fluidos ideales No-Newtonianos.

Los modelos reológicos básicos de flujo de fluidos son :

- Fluidos Newtonianos
- Fluidos No-Newtonianos

Los principales modelos matemáticos de fluidos No-Newtonianos son los siguientes

- Fluido Plástico Bingham
- Fluido Ley de Potencia

- Otros modelos de fluidos

### 2.4.1. FLUIDOS NEWTONIANOS

La ecuación matemática que describe el comportamiento reológico de un fluido Newtoniano en flujo laminar es :<sup>1-2</sup>

$$\tau = \mu_p \cdot V$$

Donde :

- $\tau$  es esfuerzo de corte
- $V$  es velocidad de corte
- $\mu_p$  es coeficiente de viscosidad absoluta

Esta ecuación es una línea recta que pasa por el origen de coordenadas del gráfico velocidad de corte y esfuerzo de corte. La pendiente de esta línea recta es el coeficiente de viscosidad absoluta del fluido, el cual es independiente de la velocidad de corte a presión y temperatura constantes.

Esta relación se conoce como la ecuación de Newton de la viscosidad, que describe el comportamiento de flujo de fluidos como agua, gasolina, salmuera y algunos líquidos orgánicos puros.

### 2.4.2. FLUIDOS NO NEWTONIANOS

El término fluido No-Newtoniano describe todos los fluidos cuyos comportamientos son diferentes al de un fluido Newtoniano. Los fluidos No-Newtonianos no tienen un factor de proporcionalidad directa y constante entre esfuerzo de corte y velocidad de corte a temperatura y presión constantes; es decir, la viscosidad aparente del fluido varía con la velocidad de corte. La mayoría de fluidos de perforación y lechadas de cemento son fluidos No-Newtonianos.<sup>1</sup>

Los fluidos No-Newtonianos que son dependientes de la velocidad de corte son :<sup>3</sup>

- Seudoplásticos : si la viscosidad aparente disminuye con el incremento de la velocidad de corte
- Dilatantes : si la viscosidad aparente aumenta con el incremento de velocidad de corte

Los modelos matemáticos de fluido más empleados para describir el comportamiento de fluidos No-Newtonianos son

- Plástico Bingham
- Ley de Potencia
- Otros modelos de fluidos

Los modelos reológicos Plástico Bingham y Ley de Potencia son empleados para aproximar el comportamiento seudoplástico de fluidos de perforación y lechadas de cemento.

#### **2.4.2.1. FLUIDOS PLASTICO BINGHAM**

La ecuación matemática que describe el comportamiento reológico de un fluido Plástico Bingham es la siguiente : <sup>1-2</sup>

$$\mathbf{t} = \mathbf{Y}P + (\mathbf{P}V) \cdot V$$

En coordenadas cartesianas esta ecuación es una línea recta, donde

- **t** es esfuerzo de corte
- **V** es velocidad de corte
- **PV** es viscosidad plástica, es la pendiente de la línea recta del gráfico en coordenadas cartesianas de velocidad de corte y esfuerzo de corte
- **YP** es punto de cedencia, es la intercepción de la línea recta con el eje de esfuerzo de corte

El punto de cedencia (**YP**) es el esfuerzo de corte que se necesita aplicar para producir movimiento del fluido. También es aquella parte de la resistencia al flujo creada por las

fuerzas eléctricas de atracción de sólidos coloidales del fluido. Su magnitud depende del tipo, tamaño y cantidad de esas partículas pequeñas.

El punto de cedencia es la propiedad de fluido dominante que afecta las propiedades de pérdidas de presión por fricción, capacidad de transporte de recortes perforados y punto de transición entre flujo laminar y turbulento.

La viscosidad plástica (**PV**) es aquella parte de la resistencia al flujo que resulta de la fricción mecánica de sólidos presentes en el fluido. Esta resistencia depende de la cantidad, tipo y tamaño de partículas sólidas en la fase fluida. Cuando el contenido de sólidos aumenta, entonces la fricción entre las partículas aumenta y el esfuerzo de corte requerido para inducir una unidad de velocidad de corte en el fluido también se incrementa.

La viscosidad aparente o efectiva se define como el esfuerzo de corte dividido por la velocidad de corte. Es la pendiente de la línea recta trazada desde el origen de coordenadas hasta el esfuerzo de corte para alguna particular velocidad de corte. Esta viscosidad disminuye con el incremento de velocidad de corte, fenómeno que se conoce como adelgazamiento por corte, característico de los fluidos No-Newtonianos.

El modelo de fluido Plástico Bingham describe con precisión razonable el comportamiento de muchos fluidos de perforación y cementación. El viscosímetro cilíndrico rotacional fue especialmente diseñado para facilitar el empleo de este modelo en el campo. Sin embargo, dicho modelo de fluido no representa con exactitud el comportamiento reológico de fluidos de perforación y lechadas de cemento a bajas velocidades de corte.

#### **2.4.2.2. FLUIDOS LEY DE POTENCIA**

La ecuación matemática que describe el comportamiento reológico de un fluido Ley de Potencia es la siguiente : <sup>1-2</sup>

$$\tau = K.V^n$$

En coordenadas logarítmicas la ecuación es una línea recta :

$$\log(\tau) = \log(K) + n\log(V)$$

Donde :

- **t** es esfuerzo de corte
- **V** es velocidad de corte
- **n** es índice de comportamiento de flujo en unidad adimensional, es la pendiente de la línea recta del gráfico en coordenadas logarítmicas de velocidad de corte y esfuerzo de corte
- **K** es índice de consistencia del fluido en  $\text{lbf}\cdot\text{s}^n/\text{p}^2$ , es la intercepción de la línea recta con el eje de esfuerzo de corte para velocidad de corte de  $1 \text{ s}^{-1}$
- **log** es logaritmo natural o logaritmo decimal

El modelo de fluido Ley de Potencia indica que los fluidos se moverán bajo cualquier fuerza aplicada. El parámetro índice de comportamiento de flujo (**n**) indica el grado de desviación del comportamiento de fluido Newtoniano. Para el caso especial de **n=1** la ecuación es la de un fluido Newtoniano, siendo el parámetro **K** igual a la viscosidad absoluta.

Si **n** es menor que 1 el fluido es pseudoplástico, la viscosidad efectiva disminuye con aumentos en la velocidad de corte, comportamiento que se conoce como adelgazamiento por corte. Si **n** es mayor que 1 el fluido es dilatante, la viscosidad efectiva incrementa con aumentos en la velocidad de corte, comportamiento que se denomina engrosamiento por corte. La mayoría de fluidos de perforación y cemento son pseudoplásticos, por eso en trabajos de reología sólo se estudian los fluidos pseudoplásticos.

El parámetro índice de consistencia (**K**) es indicativo de la bombeabilidad o engrosamiento total del fluido y de alguna manera es análogo a la viscosidad efectiva. Cuando **K** aumenta el fluido se vuelve más viscoso.

El modelo Ley de Potencia describe con mayor exactitud el comportamiento reológico de fluidos de perforación sobre rangos de bajas velocidades de corte que se producen en los espacios anulares de un pozo. Sin embargo, como este modelo no considera el parámetro punto de cedencia, proporciona deficientes resultados a muy bajas velocidades de corte.

### **2.4.2.3. OTROS MODELOS DE FLUIDOS**

Se han desarrollado otros dos principales modelos de fluidos No-Newtonianos, los cuales a bajas velocidades de corte tienen comportamiento intermedio entre los modelos de fluido Plástico Bingham y Ley de Potencia.

Dichos modelos de fluidos No-Newtonianos son los siguientes : <sup>1</sup>

- Robertson-Stiff
- Herschel-Bulkley

Dichos modelos matemáticos de fluido tienen tres parámetros y son híbridos de los modelos de fluido Plástico Bingham y Ley de Potencia. El modelo Robertson-Stiff incluye la resistencia de gel como un parámetro, mientras que el de Herschel-Bulkley es un modelo Ley de Potencia con punto de cedencia. Para la mayoría de las aplicaciones en el campo de petróleo, el modelo Herschel-Bulkley produce relaciones matemáticas que no son fáciles de solucionar. Por esas razones prácticas dicho modelo es poco usado en la industria petrolera.

### **2.4.2.4. COMPORTAMIENTO DEPENDIENTE DEL TIEMPO**

Debido a la atracción eléctrica de sólidos coloidales, la mayoría de fluidos de perforación y cemento desarrollan resistencia de gel durante el tiempo que están sin movimiento, comportamiento conocido como thixotrópico. Cuando esos fluidos son sometidos a fuerza cortante, la estructura de gel es destruida en un corto periodo de tiempo permitiendo que las ecuaciones de Plástico Bingham y Ley de Potencia puedan ser usadas para describir el comportamiento de flujo del fluido.

Los fluidos No-Newtonianos que son dependientes del tiempo de corte son : <sup>3</sup>

- Thixotrópicos : si la viscosidad aparente disminuye con el tiempo después que la velocidad de corte es aumentada a un nuevo valor constante
- Rheopéticos : si la viscosidad aparente incrementa con el tiempo

después que la velocidad de corte es aumentada a un nuevo valor constante

Actualmente no se tiene modelos matemáticos para describir el comportamiento thixotrópico de fluidos. Los fluidos de perforación y cemento son usualmente fluidos thixotrópicos y pseudoplásticos. Sin embargo, dichos fluidos generalmente son agitados antes de efectuar las mediciones de esfuerzos de corte a determinadas velocidades de corte, de manera que las condiciones de estado estable son obtenidas.

Existe retraso de tiempo entre un ajuste de la velocidad de corte y la estabilización del esfuerzo de corte a su valor correspondiente. El esfuerzo de corte se estabiliza más rápidamente cuando la velocidad de corte es disminuída que cuando es aumentada. Por eso, en un viscosímetro rotacional los fluidos deben ser cortados a altas velocidades por algún tiempo antes que sus propiedades sean medidas.

El punto de cedencia mide las fuerzas de atracción del fluido en condiciones de flujo, mientras que la resistencia de gel mide las fuerzas de atracción en condiciones estáticas. La resistencia de gel aumenta con el tiempo: si aumenta en magnitud importante con el tiempo, es fuerte o progresiva; si sólo aumenta ligeramente con el tiempo, es débil o frágil.

## **2.5. VISCOSIMETRO CILINDRICO CONCENTRICO ROTACIONAL**

### **2.5.1. PRINCIPIO FUNDAMENTAL**

La velocidad de corte y esfuerzo de corte están definidas para dos capas de fluido que se deslizan en direcciones paralelas sin intercambio de masa de fluido entre las capas.

Sería difícil construir un viscosímetro basado en el movimiento relativo de dos capas planas paralelas. Sin embargo, la rotación de un cilindro exterior alrededor de uno interior es similar al movimiento relativo de placas paralelas. Este principio se aplica en el viscosímetro cilíndrico rotacional.

El análisis de propiedades de flujo de fluidos con el viscosímetro cilíndrico concéntrico rotacional depende de las siguientes suposiciones : <sup>1</sup>

- El comportamiento de flujo del fluido es independiente del tiempo
- El flujo de fluido es laminar
- El sistema de fluido está en equilibrio
- La velocidad del fluido en la bobina o cilindro estacionario es cero
- El fluido está completamente definido por el modelo de fluido

Para efectuar un análisis significativo es necesario asumir que el fluido tiene propiedades de flujo independientes del tiempo. El estado de equilibrio de un sistema de fluido puede ser considerado como aquel que ocurre después de un tiempo muy largo o infinito de flujo.

Sólo si el flujo laminar es posible analizar los esfuerzos de corte y velocidades de corte en un fluido. El viscosímetro rotacional está diseñado para asegurar flujo laminar entre el rotor y la bobina para las típicas viscosidades y velocidades de corte aplicadas en el campo petrolero.

En el estado de equilibrio mecánico la fuerza resultante que actúa sobre el fluido es cero, entonces la fuerza de fricción es de igual magnitud pero de sentido opuesto a la fuerza aplicada. La presunción de estado de equilibrio permite definir el esfuerzo de corte como una función de la distancia radial.

La suposición fundamental de mecánica de fluidos establece que el fluido en inmediato contacto con una pared sólida tiene la misma velocidad que la pared. Entonces, en el viscosímetro rotacional la velocidad del fluido en la bobina es cero y en la camisa es igual a la velocidad del rotor.

La suposición que el fluido está completamente definido por el modelo reológico permite expresar la velocidad de corte como una función del esfuerzo de corte ; esto es, la velocidad de corte puede ser expresada como una función de la distancia radial.

### **2.5.2. DIMENSIONES Y MODELOS DE VELOCIDADES**

El viscosímetro cilíndrico rotacional es el instrumento más común para medir relaciones entre esfuerzo de corte y velocidad de corte de fluidos. Un típico viscosímetro de este tipo tiene los siguientes componentes principales : cilindro exterior o rotor, cilindro interior

o bobina, resorte de torsión y disco selector.

El fluido se coloca en el espacio anular entre el rotor y la bobina, el rotor es girado a velocidad angular constante mediante un motor eléctrico. La resistencia del fluido al flujo transmite un torque de giro en la bobina estacionaria, torque medido por un resorte de torsión conectado a la bobina que produce una deflexión en el disco selector.

### **2.5.2.1. DIMENSIONES**

La configuración geométrica específica de rotor y bobina determina las velocidades de corte que se pueden obtener con los viscosímetros cilíndricos rotacionales. La combinación R1-B1 de rotor y bobina es la más empleada para pruebas de reología de fluidos, sus dimensiones están especificadas en el API RP 13B-Field Testing Drilling Fluids.

Las dimensiones de los cilindros para la combinación normal R1-B1 de rotor y bobina son las siguientes

- Diámetro interno del rotor 36.83 mm
- Longitud total del rotor 87.00 mm
- Diámetro de la bobina 34.49 mm
- Longitud de la bobina 38.00 mm
- Constante del resorte de torsión : 386 dyna-cm/grado deflexión

### **2.5.2.2. MODELOS DE VELOCIDADES**

Los viscosímetros de dos velocidades con rotor y bobina R1-B1 miden los esfuerzos de corte del fluido a las velocidades de rotación de 600 y 300 RPM, que corresponden a velocidades de corte de 1021 y 511 s<sup>-1</sup>. El esfuerzo de corte es leído directamente en lbf/100 p<sup>2</sup> ya que el factor de corrección se redondea a 1 (valor exacto del factor=1.065).

La medición de esfuerzos de corte a velocidades de 1021 y 511 s<sup>-1</sup> no describe con exactitud las propiedades reológicas para el rango de velocidades de corte de todas las situaciones de flujo de fluidos. Por esta razón, se han desarrollado los viscosímetros de velocidades múltiples para medir dichas propiedades del fluido a diferentes velocidades

de corte.

Los viscosímetros de 6 y 12 velocidades utilizan las mismas configuraciones de rotor, bobina, disco selector y resorte como el de dos velocidades. Los viscosímetros de seis velocidades tienen 600; 300; 200; 100; 6 y 3 RPM Los de doce velocidades tienen 600; 300; 200; 180; 100; 90; 60; 30; 6; 3; 1.8 y 0.9 RPM

### **2.5.3 RESOLUCION MATEMATICA**

La rotación del cilindro exterior en lugar del cilindro interior permite extender la transición de flujo laminar a turbulento a altas velocidades de corte. Como sólo el flujo laminar puede ser descrito analíticamente, todas las mediciones de características de fluidos deben efectuarse en flujo laminar.

Cuando el rotor gira a velocidad angular constante y la bobina está sin movimiento, el torque aplicado por el resorte de torsión a la bobina es de igual magnitud y de dirección opuesta al torque aplicado por el motor al rotor. El torque es transmitido entre el rotor y la bobina por el arrastre viscoso entre las sucesivas láminas de fluido.

La capa de fluido inmediatamente adyacente al rotor se mueve a la misma velocidad angular del rotor y la capa de fluido en contacto con la bobina no tiene movimiento. Sucesivas láminas de fluido entre ambos cilindros se mueven a menores velocidades angulares.

Se realiza el balance de fuerzas y momento torsor para el estado de equilibrio de una lámina delgada de fluido. La resolución matemática determina la e-cuación del torque en la bobina que ocasiona el esfuerzo de corte del fluido : <sup>1-3</sup>

$$M = 2\pi r_b^2 (h+a) t_b$$

Donde :

- **r<sub>b</sub>** es radio de la bobina o cilindro interior
- **h** es altura de la bobina
- **a** es factor de corrección que considera el efecto del esfuerzo de corte en el fondo de la bobina

- $t_b$  es esfuerzo de corte en la bobina
- $M$  es momento torsor en la bobina

El torque es medido mediante el resorte de torsión. La relación matemática es la siguiente :

$$M = k_0 L$$

Donde :

- $k_0$  es constante del resorte de torsión
- $L$  es lectura en grados de deflexión en el disco selector

Reemplazando ambas expresiones para el torque en la bobina se tiene

$$M = 2\pi r_b^2 (h+a) t_b = k_0 L$$

$$t_b = \frac{k_0 L}{2\pi r_b^2 (h+a)}$$

Se determina que la velocidad de corte del fluido en la bobina está expresada por la siguiente relación :

$$V_{cb} = \frac{4\pi N b^2}{60(b^2-1)}$$

Donde :

- $N$  es velocidad angular de rotación del rotor en RPM
- $r_r$  es radio del rotor
- $r_b$  es radio de la bobina
- $b$  es la relación  $r_r/r_b$
- $t_b$  es esfuerzo de corte en la bobina
- $V_{cb}$  es velocidad de corte en la bobina

#### 2.5.4. RELACIONES PARA VELOCIDAD DE CORTE Y ESFUERZO DE CORTE DEL FLUIDO

Las dimensiones de rotor y bobina R1-B1 son: 36.83 mm de diámetro del rotor, 34.49 mm de diámetro de la bobina, 38.00 mm de longitud de la bobina y 386 dyna-cm/grado deflexión de constante del resorte de torsión.

Reemplazando estos valores en las ecuaciones de  $t_b$  y  $V_{cb}$  se tiene : <sup>1-2-14</sup>

$$t_b = 0.01065L$$

$$V_{cb} = 1.7023N$$

Donde :

- **L** es lectura en grados de deflexión en el disco selector
- **N** es velocidad angular de rotación del rotor en RPM
- $t_b$  es esfuerzo de corte en la bobina en lbf/p<sup>2</sup>
- $V_{cb}$  es velocidad de corte en la bobina en s<sup>-1</sup>

El factor 0.01065 para  $t_b$  se obtiene considerando el factor de corrección **a** del efecto del esfuerzo de corte en el fondo de la bobina, el cual ya ha sido incluido por los investigadores en el factor total. Asimismo, la fórmula de velocidad de corte en la bobina fue derivada para fluidos Newtonianos, pero ha sido extendida para fluidos Bingham y Ley de Potencia.

#### 2.6. METODO DE MINIMOS CUADRADOS

Sean **P** puntos dispersos de coordenadas (x,y) de datos experimentales. Mediante regresión lineal por el método de mínimos cuadrados, la línea recta que ajusta dichos **P** puntos puede ser representada por la ecuación  $y = ax+b$ .

El parámetro **a** es la pendiente de la recta, el parámetro **b** es la intercepción con el eje de ordenadas y el parámetro **c** indica la desviación normal de los puntos. Las fórmulas de

regresión lineal se indican en las secciones siguientes. <sup>2</sup>

### 2.6.1. COEFICIENTE DE CORRELACION

El coeficiente de correlación del ajuste por mínimos cuadrados se calcula mediante la siguiente ecuación :

$$c = \frac{P\Sigma xy - \Sigma x \Sigma y}{\{[P\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2][P\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]\}^{(1/2)}}$$

Dicho coeficiente es menor o igual que 1. Cuando el coeficiente más se aproxima a 1 indica mejor ajuste de la regresión lineal de **P** puntos dispersos de coordenadas (x,y).

### 2.6.2. PENDIENTE DE LA RECTA

La pendiente de la recta de regresión lineal se determina mediante la siguiente relación

$$a = \frac{\Sigma y \Sigma x - P \Sigma xy}{(\Sigma x)^2 - P \Sigma x^2}$$

### 2.6.3. INTERCEPCION CON EJE DE ORDENADAS

El parámetro **b** o intercepción con el eje de ordenadas de la regresión lineal se calcula mediante la siguiente relación :

$$b = \frac{\Sigma xy \Sigma x - \Sigma y \Sigma x^2}{(\Sigma x)^2 - P \Sigma x^2}$$

### **3. PROGRAMA PARA DISEÑAR HIDRAULICA DE PERFORACION PARA FLUIDO BINGHAM**

#### **3.1. SUMARIO DEL TRABAJO**

Este trabajo se basa en las relaciones matemáticas derivadas por Kendall-Goins <sup>7</sup> y Robinson <sup>11</sup> para optimizar la hidráulica de perforación en función del exponente **u** de la ecuación  $P_c = kQ^u$  de pérdidas de presión por fricción del sistema de circulación de lodo sin considerar la broca.

El programa de computadora diseña la hidráulica de perforación en la broca para fluido Bingham mediante dichas relaciones matemáticas de optimización y con el valor del exponente **u**, asumido de 1.86 o determinado mediante regresión lineal.

Para cada método de optimización de hidráulica y para cada profundidad de pozo se determinan los siguientes parámetros :

- Pérdida óptima de presión en la broca
- Caudal óptimo de circulación
- Diámetros de boquillas
- Caída de presión en la broca
- Fuerza de impacto en el fondo del hueco
- Potencia hidráulica y energía específica en la broca
- Densidad equivalente de circulación
- Número de Reynolds para el caudal óptimo
- Número de Reynolds Crítico en el espacio anular entre el hueco y la tubería pesada

El programa se emplea para diseñar la hidráulica de perforación para un pozo próximo a ser perforado. También puede ser usado para revisar el pronóstico de hidráulica para un pozo en perforación, siendo necesario determinar previamente el exponente **u** de la ecuación  $P_c = kQ^u$  de pérdidas de presión por fricción, mediante regresión lineal por computadora o por método gráfico como pendiente de la línea de  $\log(P_c) - \log(Q)$ .

### **3.2. OPTIMIZACION DE PERFORACION DE POZOS**

La optimización de perforación de pozos es el proceso lógico de analizar los efectos e interacciones de las variables de perforación mediante modelos matemáticos para alcanzar máxima eficiencia de perforación. El objetivo final de la optimización es reducir los costos de perforación de pozos.

El proceso comprende evaluar registros de información de pozos cercanos para determinar la efectividad en el costo de perforación de variables controlables como tipo de lodo, hidráulica, tipo de broca, peso sobre broca y velocidad de rotación. Se determinan las variables que ofrecen los mayores potenciales para mejorar el proceso de perforación y se elabora un programa optimizado de perforación, el cual debe ser flexible para permitir cambios en su aplicación cuando se encuentran problemas inesperados en la perforación del pozo. <sup>4</sup>

El concepto de optimización de perforación de pozos se basa en las siguientes normas y suposiciones :

- Todas las variables de perforación están correlacionadas, cambios en una variable afectan a todas las demás
- Los factores de tipo, cantidad y tamaño coloidal de sólidos de arcilla afectan a todas las otras variables
- Para optimización efectiva, el análisis de variables debería efectuarse en el siguiente orden
  - Tipo de fluido de perforación y sólidos del lodo
  - Propiedades de flujo del lodo para limpieza y estabilización del hueco
  - Hidráulica de perforación : limpieza de la broca, limpieza y estabilidad del hueco
  - Tipo de broca
  - Condiciones de peso sobre la broca y velocidad de rotación para la broca seleccionada
- Aplicación consistente de técnicas de optimización durante las

### **3.2.1. VARIABLES DE OPTIMIZACION DE PERFORACION**

Las variables que intervienen en el proceso de perforación de pozos son las siguientes : <sup>4</sup>

- Profundidad de formación
- Propiedades físicas de roca de formación
- Peso sobre la broca
- Velocidad de rotación
- Contenido de sólidos del lodo
- Pérdida de fluido (filtrado) del lodo
- Propiedades reológicas del fluido de perforación
- Velocidad de flujo en las boquillas
- Caudal de circulación de lodo
- Presión total en superficie
- Presión diferencial
- Tipo de broca

Las variables consideradas en las técnicas de optimización de perforación de pozos son de dos tipos :

- Variables controlables
- Variables no controlables

Las **variables controlables** son las que pueden ser modificadas según las necesidades del pozo y son las siguientes :

- Tipo de fluido de perforación
- Hidráulica de perforación
- Tipo de broca
- Peso sobre la broca
- Velocidad de rotación

Las **variables no controlables** no pueden ser modificadas a voluntad y son las siguientes :

- Profundidad de formación
- Propiedades físicas de formación

La suposición básica de optimización es que todas las variables están correlacionadas e interactúan. Una interacción de variables es positiva cuando el incremento simultáneo de dos o más variables produce un efecto mayor que la suma de efectos de aplicación individual de cada variable, mientras que la interacción es negativa cuando dicho efecto es menor que la suma de efectos de aplicación de cada variable.

Las interacciones son afectadas por los niveles de aplicación de cada variable y por la formación perforada. El éxito o fracaso de un programa de optimización depende de la comprensión de dichas interacciones y de la manera en que son empleadas para mejorar la eficiencia de perforación de pozos.

Fundamentalmente, las técnicas de optimización han cubierto la brecha entre perforación por suposición y uso de costosas computadoras en el sitio de la perforación. La combinación de esfuerzos de investigación, pruebas de campo y empleo de computadoras ha resultado en técnicas que pueden ser usadas para determinar los efectos de las variables controlables e incrementar la eficiencia de la perforación de pozos.

### **3.2.2. FLUIDOS DE PERFORACION**

#### **3.2.2.1. DEFINICION**

El Instituto Americano de Petróleo (API) define el fluido de perforación como un fluido de circulación empleado en la perforación rotaria para realizar cualquiera o todas de varias funciones requeridas en una operación de perforación. La perforación rotaria es imposible sin un fluido de circulación, siendo la variable más importante.

Un fluido de perforación es óptimo cuando el caudal de circulación necesario para limpiar el hueco resulta en la potencia hidráulica adecuada para limpiar la broca para el peso so-

bre broca y velocidad de rotación impuestos a fin de obtener el menor costo, resultando esta combinación de variables en un hueco perforado estable que cumple con los objetivos de evaluación de formación y de velocidad de penetración. <sup>4</sup>

### **3.2.2.2. FUNCIONES**

Las cinco principales funciones del fluido de perforación son las siguientes : <sup>4</sup>

- Enfriar y lubricar la broca
- Limpiar el fondo del hueco de recortes perforados
- Transportar los recortes perforados a superficie
- Estabilizar las paredes del hueco del pozo
- Permitir adecuada evaluación de formaciones

La función de limpieza completa del fondo del hueco es raramente alcanzada. La remoción de recortes perforados debajo de la broca depende de las siguientes variables :

- Peso sobre broca
- Velocidad de rotación
- Tipo de broca
- Caudal de circulación
- Presión diferencial
- Velocidad de flujo en las boquillas
- Ubicación y tamaño de boquillas
- Filtrado del lodo
- Contenido de sólidos del lodo

### **3.2.3. IMPORTANCIA DE REOLOGIA DE FLUIDOS**

El estudio de modelos matemáticos de fluidos permite evaluar las propiedades de flujo de fluidos de perforación. Las propiedades reológicas de estos fluidos permiten determinar :

- Capacidad de limpieza del hueco

- Propiedades de suspensión de sólidos del lodo
- Pérdidas de presión por fricción en las tuberías y en el espacio anular entre el hueco y tuberías
- Densidad equivalente de circulación
- Presiones de surgencia y de succión
- Estimar el grado de erosión del hueco
- Pérdidas de presión en la broca
- Optimizar la hidráulica de perforación
- Tratamientos del fluido de perforación

### **3.2.4. FLUJO LAMINAR EN TUBERIAS Y ESPACIOS ANULARES**

Si el caudal de circulación es suficientemente bajo para que el régimen de flujo sea laminar, los modelos de fluidos Newtoniano, Plástico Bingham y Ley de Potencia pueden ser empleados para desarrollar relaciones matemáticas entre caudal de flujo y caídas de presión por fricción. <sup>3</sup>

En este desarrollo se efectúan las siguientes suposiciones de simplificación

- La sarta de perforación está colocada concéntricamente en la tubería de revestimiento o en hueco abierto
- No hay rotación de la tubería de perforar
- Las secciones de hueco abierto son de forma circular y de diámetro conocido
- El fluido de perforación es incompresible
- El flujo es isotérmico

En realidad ninguna de dichas suposiciones es totalmente válida y el sistema resultante de ecuaciones no describe perfectamente el flujo laminar de fluidos en el pozo. Se han realizado estudios de efectos de excentricidad, rotación de tubería y variaciones de presión y temperatura sobre las gradientes de presión fluyente; sin embargo, la complejidad de cálculos adicionales requeridos para remover dichas suposiciones rara vez se justifica en la práctica de perforación de pozos.

### **3.2.5. IMPORTANCIA DE HIDRAULICA DE PERFORACION**

La hidráulica de perforación es una variable controlable en las técnicas de optimización, en formaciones blandas tiene interacción positiva con las siguientes variables : <sup>4</sup>

- Peso sobre la broca
- Velocidad de rotación
- Bajo contenido de sólidos en el lodo
- Fluidos de perforación no dispersos

La optimización de la energía hidráulica gastada en la broca permite aplicar mejores niveles de parámetros de peso sobre la broca y velocidad de rotación, favoreciendo el aumento de la eficiencia de la perforación; es decir, mayor velocidad de penetración y reducción de los costos de perforación.

Se maximiza la eficiencia de perforación cuando un programa de hidráulica adecuado suministra suficiente velocidad en las boquillas y velocidad de flujo cruzado en la cara de la roca para limpiar la broca y remover los recortes perforados. Es posible lograr aumentos importantes en la velocidad de penetración mediante el cálculo apropiado de las boquillas.

En formaciones blandas la fuerza de impacto hidráulico del fluido que sale de las boquillas puede ayudar en destruir el fondo del hueco. En formaciones con bajos esfuerzos de compresión, aumentos en la velocidad de penetración se deben principalmente a la mejor limpieza del fondo del hueco. Se evita la reperfuración de recortes si el fluido remueve los recortes debajo de la broca tan rápido como estos son formados.

### **3.3. METODOS DE OPTIMIZACION DE HIDRAULICA DE PERFORACION**

Los métodos matemáticos de optimización de hidráulica de perforación en la broca son : <sup>1-2-3</sup>

- Máxima potencia hidráulica en la broca con presión constante en superficie
- Máxima fuerza de impacto en fondo del hueco con presión cons-

tante en superficie

- Máxima fuerza de impacto en fondo del hueco con potencia hidráulica constante en superficie

Los métodos de diseño hidráulico más usados son los de máxima potencia hidráulica en la broca y máxima fuerza de impacto de fluido. Actualmente todavía hay desacuerdos en cuanto a cuál método de optimización hidráulica debe ser usado para lograr la mayor acción de limpieza hidráulica en el fondo del hueco.

Cuando se maximizan los factores de potencia hidráulica en la broca o fuerza de impacto de fluido, la velocidad de penetración podría aumentar hasta que los recortes perforados sean removidos tan rápidamente como son generados. Después de lograr este nivel de perfecta limpieza, no habrían posteriores incrementos en la velocidad de penetración con aumentos de potencia hidráulica en la broca o fuerza de impacto.

La verdadera optimización de la hidráulica de perforación en la broca todavía no puede ser alcanzada. Antes que esto pueda ser logrado, es necesario desarrollar precisas relaciones matemáticas para definir los efectos del nivel de energía hidráulica en la broca en los siguientes factores :

- Velocidad de perforación
- Costos operacionales
- Desgaste de la broca
- Problemas de erosión del hueco
- Capacidad de acarreo del fluido de perforación

La presión de superficie desarrollada por las bombas es gastada por las siguientes pérdidas de presión :

- Por fricción en las tuberías de superficie
- Por fricción en las tubería de perforar y pesada
- Por aceleración del fluido de perforación a través de las boquillas de la broca
- Por fricción en los espacios anulares entre el hueco del pozo y las tuberías

De la ecuación  $P_c = kQ^u$  que representa las pérdidas de presión en el sistema excluida la broca, Kendall y Goins <sup>7</sup> asumieron el valor de  $u=1.9$ ; posteriormente Robinson <sup>11</sup> generalizó dicha ecuación para cualquier valor del exponente  $u$ .

Para una configuración específica de profundidad de pozo, longitudes y dimensiones de tuberías y presión de superficie, optimizar la hidráulica de perforación es determinar la caída de presión óptima en la broca y el caudal óptimo de flujo de lodo en función del exponente  $u$  de la ecuación  $P_c = kQ^u$ .

### **3.3.1. MAXIMA POTENCIA HIDRAULICA EN LA BROCA CON PRESION CONSTANTE EN SUPERFICIE**

La demostración matemática de máxima potencia hidráulica en la broca fue realizada inicialmente por Kendall y Goins <sup>7</sup> para  $u=1.9$ . En este trabajo se realiza la demostración efectuada por Robinson <sup>11</sup> con el exponente  $u$  como parámetro que es determinado por método gráfico o por regresión lineal de caudales y presiones reducidas de circulación.

La presión de superficie es la suma de las caídas de presión en la broca ( $P_b$ ) y el resto del sistema de circulación ( $P_c$ ). Este método considera que la presión de superficie ( $P_m$ ) es constante, entonces se tiene

$$P_m = P_c + P_b$$

La pérdida de presión a través del sistema de circulación del fluido de perforación excluyendo la broca se expresa como

$$P_c = kQ^u$$

La caída de presión en la broca se expresa mediante la ecuación

$$P_b = wQ^2/(10858A^2)$$

Donde  $w$  es densidad del lodo,  $Q$  es caudal de flujo,  $A$  es área total de las boquillas de la broca,  $u$  es un exponente que varía entre 1 y 2,  $k$  es una constante que no es el parámetro índice de consistencia  $K$  del modelo de fluido Ley de Potencia.

$$P_m = kQ^u + P_b$$

Multiplicando por Q la ecuación anterior se tiene :

$$QP_m = Q(kQ^u) + QP_b$$

$$QP_m = kQ^{(u+1)} + HP_b$$

Donde  $HP_s = QP_m$  es la potencia hidráulica en superficie y  $HP_b = QP_b$  es la potencia hidráulica gastada en la broca.

$$HP_b = QP_m - kQ^{(u+1)}$$

En cálculo superior se demuestra que cuando la primera derivada de una función en un número crítico es igual a cero y si la segunda derivada en dicho número crítico es menor que cero, entonces la función tiene un valor máximo relativo en dicho número crítico.

Se realiza la primera derivada de la función  $HP_b$  con respecto de Q y se iguala a cero, se obtiene :

$$\frac{d(HP_b)}{dQ} = P_m - k(u+1)Q^u = 0$$

Resolviendo se tiene que Q es ahora Q óptimo ( $Q_o$ ) :

$$P_m = k(u+1)(Q_o)^u$$

La segunda derivada de la función  $HP_b$  con respecto de Q para  $Q = Q_o$  es :

$$\frac{d^2(HP_b)}{dQ^2} = -ku(u+1)(Q_o)^{(u-1)} < 0$$

Desde que la segunda derivada de la función  $HP_b$  con respecto de Q es menor que cero para la raíz  $Q_o$ , entonces la solución corresponde a un máximo; es decir, la potencia hi-

drúlica en la broca es máxima cuando el caudal  $Q_o$  es :  $P_m = k(u+1)(Q_o)^u$

Reemplazando estas ecuaciones de  $P_m$  se tiene :

$$P_m = k(Q_o)^u + P_b = k(u+1)(Q_o)^u$$

$$P_b = k(u+1)(Q_o)^u - k(Q_o)^u$$

$$P_b = ku(Q_o)^u$$

$$\frac{P_b}{P_m} = \frac{ku(Q_o)^u}{k(u+1)(Q_o)^u} = \frac{u}{u+1}$$

Queda demostrado que para presión de superficie constante, la potencia hidráulica en la broca es máxima cuando :

$$\frac{P_b}{P_m} = \frac{u}{u+1}$$

### **3.3.2. MAXIMA FUERZA DE IMPACTO CON PRESION CONSTANTE EN SUPERFICIE**

El propósito de las boquillas de broca es mejorar la limpieza de recortes en el fondo del hueco. Antes que las brocas con boquillas fueran empleadas, los recortes de formación no eran removidos eficientemente y parte importante del tiempo de vida de la broca era consumido reperforando los recortes.

Mientras la acción de limpieza del chorro del fluido que sale de las boquillas todavía no es totalmente comprendida, algunos investigadores han concluido que dicha acción de limpieza es máxima cuando también es máxima la fuerza total de impacto hidráulico que el fluido ejerce contra el fondo del hueco.

Algunos operadores prefieren determinar los tamaños de boquillas para maximizar la fuerza de impacto del fluido contra el fondo del hueco. Trabajos experimentales demos-

traron que la velocidad de flujo a través del fondo del hueco es máxima cuando la fuerza de impacto de fluido es máxima.

La demostración matemática de máxima fuerza de impacto de fluido fue derivada inicialmente por Kendall y Goins <sup>7</sup> para  $u=1.9$ . En este trabajo se realiza la demostración efectuada por Robinson <sup>11</sup> con el exponente  $u$  como parámetro.

En profundidades someras del pozo la pérdida de presión en el sistema de circulación del lodo sin incluir la broca no es significativa aún a altos caudales de flujo, y el método de máxima potencia hidráulica limita la limpieza del pozo porque requiere relativos bajos caudales para optimizar la caída de presión en el sistema de tuberías y espacios anulares.

Este método asume que la presión de superficie  $P_m$  es constante. Las ecuaciones para presión de superficie, pérdidas de presión en la broca y el resto del sistema de circulación son las mismas que en la sección precedente.

Se tiene :

$$P_m = P_c + P_b$$

$$P_b = P_m - P_c = P_m - kQ^u$$

$$Q = VA$$

Reemplazando  $Q$  para expresar  $P_b$  como función de la velocidad en las boquillas se tiene :

$$P_b = wV^2/10858 = nV^2$$

$$V = n(P_b)^{(1/2)}$$

Donde  $w$  es la densidad del lodo,  $Q$  es el caudal de flujo,  $A$  es el área total de boquillas de la broca,  $k$  y  $n$  son constantes y  $u$  es el exponente de pérdidas de presión por fricción.

La relación entre fuerza de impacto y velocidad de flujo se obtiene aplicando el teorema de cantidad de movimiento al volumen de control del fluido entre el extremo inferior de las

boquillas y el fondo del hueco. Las fuerzas originadas por las presiones de flujo del fluido se consideran de igual magnitud (igual presión e igual área) pero de sentido contrario, por lo que la única fuerza exterior que actúa sobre el fluido es la fuerza de reacción del fondo del pozo al impacto del fluido : <sup>6</sup>

$$F = wQV_2 - wQV_1$$

La velocidad vertical  $V_2$  es cero, entonces :  $V = V_1$

$$F = - wQV$$

La fuerza que ejerce el fluido sobre el fondo del pozo es :

$$F = wQV$$

Reemplazando el valor de  $V = n(P_b)^{(1/2)}$  se obtiene :

$$F = nwQ(P_b)^{(1/2)}$$

La densidad del fluido es constante, entonces  $m = nw$  es constante. Reemplazando  $P_b$  y  $P_c$  en la ecuación de  $F$  :

$$F = mQ(P_m - kQ^u)^{(1/2)} = m[P_m Q^2 - kQ(u+2)]^{(1/2)}$$

Se realiza la primera derivada de la función  $F$  con respecto de  $Q$  y se iguala a cero, se obtiene :

$$\frac{dF}{dQ} = \frac{m(2P_m Q - k(u+2)Q^{(u+1)})}{2[P_m Q^2 - kQ(u+2)]^{(1/2)}}$$

Resolviendo se tiene que  $Q$  es ahora  $Q$  óptimo ( $Q_o$ ) :

$$2P_m Q_o = k(u+2)(Q_o)^{(u+1)}$$

$$P_m = [k(u+2)(Q_o)^u]/2$$

La segunda derivada de la función F con respecto de Q para  $Q = Q_0$  es :

$$\frac{d^2F}{dQ^2} = -m(u+2)[0.5ku(Q_0)^{u-2}]^{1/2} < 0$$

Desde que la segunda derivada de la función F con respecto de Q es menor que cero para la raíz  $Q_0$ , entonces la solución corresponde a un máximo; es decir, la fuerza de impacto es máxima cuando el caudal  $Q_0$  es :  $P_m = [k(u+2)(Q_0)^u]/2$

Resolviendo para  $P_b$  se tiene :

$$P_b = P_m - P_c = [k(u+2)(Q_0)^u]/2 - k(Q_0)^u$$

$$P_b = \frac{k(u+2)(Q_0)^u}{2} - k(Q_0)^u = \frac{ku(Q_0)^u}{2}$$

$$P_b = \frac{ku(Q_0)^u}{2}$$

$$\frac{P_b}{P_m} = \frac{0.5ku(Q_0)^u}{0.5k(u+2)(Q_0)^u} = \frac{u}{u+2}$$

Queda demostrado que para presión de superficie constante, la fuerza de impacto hidráulico contra el fondo del hueco es máxima cuando :

$$\frac{P_b}{P_m} = \frac{u}{u+2}$$

### **3.3.3. MAXIMA FUERZA DE IMPACTO CON POTENCIA HIDRAULICA CONSTANTE EN SUPERFICIE**

Este método asume que la potencia hidráulica en superficie es constante. La potencia hi-

dráulica constante en superficie se expresa matemáticamente como :

$$HP_s = P_s Q = \text{constante} = c$$

Las ecuaciones de presión de superficie, caídas de presión en la broca y el resto del sistema de circulación son las mismas que en la sección precedente. Además se tiene

$$P_b = c/Q - kQ^u$$

La ecuación para F determinada en la sección precedente es :

$$F = mQ(P_b)^{(1/2)}$$

Reemplazando la relación de  $P_b = c/Q - kQ^u$  se tiene :

$$F = mQ(c/Q - kQ^u)^{(1/2)}$$

$$F = m(cQ - kQ^{(u+2)})^{(1/2)}$$

Se realiza la primera derivada de la función F con respecto de Q y se iguala a cero, se obtiene :

$$\frac{dF}{dQ} = \frac{m(c - k(u+2)Q^{(u+1)})}{2(cQ - kQ^{(u+2)})^{(1/2)}} = 0$$

Resolviendo se tiene que Q es ahora Q óptimo ( $Q_o$ ) :

$$c - k(u+2)(Q_o)^{(u+1)} = 0$$

$$c = k(u+2)(Q_o)^{(u+1)} = P_s Q_o$$

$$P_s = k(u+2)(Q_o)^u$$

La segunda derivada de la función F con respecto de Q para  $Q = Q_o$  es :

$$\frac{d^2F}{dQ^2} = -0.5m(u+2)[k(u+1)(Q_0)^{(u-2)}]^{(1/2)} < 0$$

Desde que la segunda derivada de F con respecto de Q es menor que cero para la raíz  $Q_0$ , entonces la solución corresponde a un máximo; es decir, la fuerza de impacto es máxima cuando el caudal  $Q_0$  es :  $P_s = k(u+2)(Q_0)^u$

Resolviendo para  $P_b$  se tiene :

$$P_b = P_s - P_c = k(u+2)(Q_0)^u - k(Q_0)^u$$

$$P_b = k(u+1)(Q_0)^u$$

$$\frac{P_b}{P_s} = \frac{k(u+1)(Q_0)^u}{k(u+2)(Q_0)^u} = \frac{u+1}{u+2}$$

Queda demostrado que para potencia hidráulica constante en superficie, la fuerza de impacto hidráulico contra el fondo del hueco es máxima cuando :

$$\frac{P_b}{P_s} = \frac{u+1}{u+2}$$

### **3.3.4. RECOMENDACIONES PARA PRACTICAS DE OPTIMIZACION**

No siempre es recomendable tener el factor óptimo entre pérdida de presión en la broca y presión de superficie. Es conveniente seleccionar un tamaño adecuado de camisa de bomba para todo o mayor parte del pozo más que reducir el tamaño de lana a medida que aumenta la profundidad del pozo para tratar de lograr la máxima potencia hidráulica o fuerza de impacto.

En partes superficiales del pozo el caudal de flujo es mantenido constante al máximo valor que se puede alcanzar con el tamaño de lana seleccionado. Con los aumentos de profundidad y peso de lodo, el caudal disminuye hasta el valor previamente calculado

como el mínimo para limpieza adecuada del hueco.

Cuando se tiene bombas de superficie de alta potencia y las pérdidas de presión por fricción son bajas debido al uso de tuberías de diámetros grandes y lodos de bajos peso y viscosidad, es posible tener más energía hidráulica en la broca que la necesaria para limpiar adecuadamente el fondo del hueco.

Si las necesidades de limpieza del hueco pueden ser determinadas a partir de parámetros y velocidad de perforación tomados en similar litología, es un desperdicio emplear más potencia hidráulica en la broca que la necesaria. Entonces, la energía desarrollada por las bombas debe ser reducida disminuyendo el caudal de flujo hasta el nivel deseado de potencia hidráulica en la broca que justamente puede ser obtenido si las bombas son operadas a la máxima presión disponible.

Todavía no se ha comprobado cuál de ambos métodos de optimización hidráulica es superior, quizás la razón principal es que no hay diferencia apreciable entre ambos. Para  $u=1.86$  de la ecuación  $P_c=kQ^u$  de pérdidas de presión en el sistema de circulación se tiene : cuando la potencia hidráulica en la broca es máxima, la fuerza de impacto es 94% de su máximo valor; mientras que cuando la fuerza de impacto es máxima, entonces la potencia hidráulica en la broca es 92% de su valor máximo. <sup>1-3</sup>

### **3.4. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA**

Este trabajo presenta el programa de computadora **HIDRA** para optimizar la hidráulica de perforación a partir del método establecido en el artículo "Simulador de Pérdidas de Presión Mejora la Selección de Boquillas", publicado en Petroleum Engineer en julio de 1990. Los autores del artículo son Bizanti de Louisiana University y Moonesan de Marathon Oil.<sup>9</sup>

Dichos autores indican que los resultados generados usando el procedimiento recomendado para fluidos Plástico Bingham y Ley de Potencia tienen 1 % de desviación comparados con los obtenidos usando gráficos de pérdidas de presión por fricción. Cuando se consideran las pérdidas de presión en superficie, las desviaciones en los resultados son menores que 1%.

El programa **HIDRA** está elaborado en lenguaje BASIC para microcomputadora y compilado para ser ejecutado desde el indicador del DOS en computadoras con sistema operativo DOS y con el comando Ejecutar en computadoras con sistema operativo Windows.

El programa diseña la hidráulica de perforación para fluido Plástico Bingham mediante las relaciones matemáticas de métodos de optimización de hidráulica y con el valor del exponente **u**, asumido de 1.86 o determinado mediante regresión lineal.

Para cada método de optimización de hidráulica y para cada profundidad de pozo se determinan los siguientes parámetros : caudal óptimo de flujo, caída de presión en la broca, diámetros de boquillas, fuerza de impacto, potencia hidráulica y energía específica en la broca, Número de Reynolds y Número de Reynolds Crítico del fluido en el espacio anular entre el hueco y la tubería pesada de mayor diámetro exterior.

Este programa mejora la precisión y velocidad de selección de las boquillas de la broca en comparación con los métodos gráficos convencionales, programas para calculadoras programables y programas para microcomputadoras para exponente **u=1.86**.

### 3.4.1. FORMULAS EMPLEADAS

La nomenclatura de variables y parámetros es la siguiente

- **D<sub>b</sub>** = diámetro de la broca (pg)
- **D<sub>h</sub>** = diámetro del hueco del pozo (pg)
- **D** = diámetro interno de la tubería (pg)
- **D<sub>p</sub>** = diámetro externo de la tubería (pg)
- **w** = densidad del lodo (lbm/gln)
- **PV** = viscosidad plástica del lodo (cp)
- **YP** = punto de cedencia del lodo (lbf/100 p<sup>2</sup>)
- **Q** = caudal de flujo (gpm)
- **V** = velocidad promedio de flujo (pps)
- **NH** = Número de Hedstrom para modelo Bingham
- **NR** = Número de Reynolds para modelo Bingham
- **NRC** = Número de Reynolds Crítico para flujo turbulento

- $X_c$  = valor crítico de la relación  $Y_P/Y_w$
- $Y_w$  = esfuerzo de corte de lodo en la pared (lbf/ 100 p<sup>2</sup>)
- $f$  = factor de fricción de Fanning
- $\log$  es logaritmo de base 10
- $L$  = longitud de tubería o anillo (p)
- $P$  = presión por fricción en la tubería ó espacio anular (psi)
- $Y_1; Y_2; Y_3$  = diámetro de boquillas 1/32 pg
- $A$  = área total de boquillas (pg<sup>2</sup>)
- $P_b$  = caída de presión en la broca (psi)
- $A_b$  = área transversal de la broca (pg<sup>2</sup>)
- $V_b$  = velocidad de flujo en las boquillas (pps)
- $FI$  = fuerza de impacto hidráulico (lbf)
- $HP_b$  = potencia hidráulica en la broca (hp)
- $EB$  = energía específica en la broca (hp/pg<sup>2</sup>)

Las fórmulas empleadas en el programa son las siguientes : <sup>9</sup>

- **Velocidad promedio de flujo en la tubería**

$$V = \frac{Q}{2.448D^2}$$

- **Velocidad promedio de flujo en el espacio anular**

$$V = \frac{Q}{2.448(D_h^2 - D_p^2)}$$

- **Número de Hedstrom en la tubería**

$$NH = \frac{37100w YP D^2}{PV^2}$$

- **Número de Hedstrom en el espacio anular**

$$NH = \frac{24700w YP(D_h - D_p)^2}{PV^2}$$

- **Número de Reynolds en la tubería**

$$NR = \frac{928w V D}{PV}$$

- **Número de Reynolds en espacio anular**

$$NR = \frac{757w V D}{PV}$$

- **Número de Reynolds Crítico para flujo turbulento en la tubería**

$$NRC = \frac{NH}{8X_C} [1 - (4/3)X_C + (1/3)X_C^4]$$

Antes se debe resolver  $X_C$  de la siguiente ecuación

$$16800X_C = NH(1 - X_C)^3$$

- **Número de Reynolds Crítico para flujo turbulento en el espacio anular**

$$NRC = \frac{(2/3)^{1/2} NH}{8X_C} [1 - (3/2)X_C + 0.5(X_C)^3]$$

Antes se debe resolver  $X_C$  de la siguiente ecuación

$$22400X_C = NH(1 - X_C)^3$$

- **Pérdidas de presión por fricción en la tubería de perforar para flujo laminar**

$$P = \left( \frac{V PV}{1500D^2} + \frac{YP}{225D} \right) L$$

- **Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular para flujo laminar**

$$P = \left( \frac{V PV}{1000(D_h - D_p)^2} + \frac{YP}{200(D_h - D_p)} \right) L$$

- **Pérdidas de presión por fricción en tubería de perforar para flujo turbulento**

$$P = \left( \frac{f_w V^2}{25.8D} \right) L$$

Antes se debe resolver **f** de la siguiente ecuación :

$$f^{0.5} = 4 \log(NR f^{0.5}) - 0.395$$

- **Pérdidas de presión por fricción en el espacio anular para flujo turbulento**

$$P = \left( \frac{f_w V^2}{21.1(D_h - D_p)} \right) L$$

Antes se debe resolver **f** de la siguiente ecuación :

$$f^{0.5} = 4 \log(NR f^{0.5}) - 0.395$$

- **Area total de las boquillas de la broca**

$$A = \frac{0.7854}{(32)^2} [(Y1)^2 + (Y2)^2 + (Y3)^2]$$

- Velocidad de flujo en las boquillas de la broca

$$V_b = \frac{0.32086Q}{A}$$

- Caída de presión en la broca

$$P_b = \frac{w Q^2}{10858A^2}$$

- Fuerza de impacto hidráulico en el fondo del hueco

$$FI = \frac{w Q V_b}{1932}$$

- Potencia hidráulica gastada en la broca

$$HP_b = \frac{Q P_b}{1714}$$

- Area transversal de la broca

$$A_b = 0.7854(D_b)^2$$

- Energía específica en la broca

$$EB = \frac{HP_b}{A_b}$$

### 3.4.2. DATOS REQUERIDOS

Cuando se ejecuta el programa se presenta la siguiente lista de alternativas de selección :

- ( 1 ) Datos de tuberías y geometría de pozo
- ( 2 ) Propiedades de fluido de perforación
- ( 3 ) Presión de superficie constante
- ( 4 ) Caudal de circulación constante
- ( 5 ) Caudal de flujo y presión de superficie constantes
- ( 6 ) Diámetros de boquillas y caudal de flujo constantes
- ( 7 ) Diámetros boquillas y presión superficie constantes
- ( 8 ) Energía hidráulica específica en la broca constante
- ( 9 ) Presión de superficie y energía hidráulica específica constantes
- ( 10 ) Caudal de flujo y energía hidráulica específica constantes
- ( 11 ) Diámetros de boquillas y energía hidráulica específica constantes
- ( 12 ) Imprimir resultados
- ( 13 ) Terminar programa

Para la alternativa (1) de dimensiones de tuberías y geometría de pozo es necesario aceptar los datos propuestos o ingresar nuevos datos

- Nombre del pozo
- Número de secciones de tubería pesada
- Longitud de primera sección tubería pesada (p)
- Diámetro externo de primera sección (pg)
- Diámetro interno de primera sección (pg)
- Longitud de segunda sección de tubería pesada (p)
- Diámetro externo de segunda sección (pg)
- Diámetro interno de segunda sección (pg)
- Longitud de tercera sección de tubería pesada (p)
- Diámetro externo de tercera sección (pg)
- Diámetro interno de tercera sección (pg)
- Diámetro externo tubería perforar (pg)
- Diámetro interno tubería perforar (pg)
- Profundidad de zapato tubería revestimiento (p)
- Diámetro interno de tubería de revestimiento (pg)
- Diámetro de la broca (pg)

- Profundidad inicial del hueco (p)
- Profundidad final del hueco (p)
- Presión máxima (psi)
- Pendiente de logaritmo (P)-logaritmo (Q) ( )

Para las propiedades del fluido de perforación es necesario aceptar los datos propuestos o ingresar nuevos datos desde la profundidad inicial hasta la final para cada factor de incremento de profundidad calculado por el programa

- Densidad de lodo (lbm/gl)
- Viscosidad plástica de lodo (cp)
- Punto cedente de lodo (lbf/100 p<sup>2</sup>)

### 3.4.3. DESCRIPCION DE LOS ALGORITMOS DE CALCULO

El programa de computadora **HIDRA** tiene las siguientes alternativas de cálculo de hidráulica de perforación en la broca :

- Presión de superficie constante
- Caudal de circulación constante
- Caudal de flujo y presión de superficie constantes
- Diámetros de boquillas y caudal de flujo constantes
- Diámetros de boquillas y presión de superficie constantes
- Energía hidráulica específica en la broca constante
- Presión de superficie y energía hidráulica específica constantes
- Caudal de flujo y energía hidráulica específica constantes
- Diámetros de boquillas y energía hidráulica específica constantes

Para efectos de simplificación de este trabajo, sólo se realiza la descripción de optimización de hidráulica de perforación para la condición de **presión de superficie constante**

- El programa recupera los datos de dimensiones de tuberías y geometría de pozo del archivo **GEOMETRI.DAT**. Se presentan las opciones de ingresar nuevos datos o de no modificar los datos propuestos.

- El programa recupera los datos de densidad, viscosidad plástica y punto cedente del fluido de perforación del archivo **LODO.DAT**. Se presentan las opciones de ingresar nuevos datos y de no modificar los datos propuestos.
- Con el valor de **u** y las relaciones de optimización derivadas en las secciones **3.3.2.-3.3.3.** y **3.3.4.** se calculan los factores óptimos (pérdida de presión en la broca/presión de superficie) para los métodos de optimización de máxima potencia hidráulica y máxima fuerza de impacto.

Con estos factores y la presión de superficie se determinan los valores óptimos de pérdida de presión en la broca y de pérdida de presión por fricción en el sistema de tuberías y espacios anulares del pozo.

- Para cada profundidad se inicializa el caudal de flujo para  $Q = 200$  gpm. Para cada caudal y cada sección de geometría de pozo se calculan los Números de Hedstrom y de Reynolds con las propiedades reológicas del lodo de perforación.
- Se realizan procesos iterativos de Newton-Raphson para calcular  $X_c$ , valor crítico de la relación  $YP/Y_w$ , en función del Número de Hedstrom. Con  $X_c$  y Número de Hedstrom se calcula el Número Crítico de Reynolds, determinando si el flujo es laminar o turbulento.
- Para cada sección de geometría de pozo y cada caudal de flujo se determinan las pérdidas de presión por fricción. Si el flujo es turbulento se realizan procesos iterativos de Newton-Raphson para resolver el factor Fanning de pérdidas de presión por fricción.
- Si el valor absoluto de la diferencia entre la suma total de pérdidas de presión por fricción y la óptima pérdida de presión por fricción en el sistema de tuberías y espacios anulares es menor o igual que 10 psi, entonces el caudal de circulación es el caudal óptimo de flujo del lodo de perforación.

- Para cada método de optimización y cada profundidad se determinan los siguientes parámetros mediante el caudal óptimo y las relaciones matemáticas indicadas en la sección **3.4.1.** : diámetros óptimos de boquillas, caída de presión en la broca, fuerza de impacto, potencia hidráulica y energía específica en la broca, densidad equivalente de circulación, Número de Reynolds y Número de Reynolds Crítico para flujo turbulento en el espacio anular entre el hueco y la tubería pesada de mayor diámetro exterior.
- Si el valor absoluto de la diferencia entre la suma total de pérdidas de presión por fricción y la óptima pérdida de presión por fricción en el sistema de tuberías y espacios anulares es mayor que 10 psi, entonces el caudal de flujo es interpolado y se regresa a realizar los procesos iterativos anteriores con el nuevo valor de caudal.
- Esta secuencia de procesos iterativos se realiza hasta que se determina el caudal de flujo para el cual el valor absoluto de la diferencia entre la suma total de pérdidas de presión por fricción y la óptima pérdida de presión es menor o igual que 10 psi.

#### **3.4.4. RESULTADOS OBTENIDOS**

Para las opciones de cálculo de hidráulica en la broca que se indican en las secciones **3.4.2.** y **3.4.3.**, el programa de computadora determina los siguientes parámetros hidráulicos :

- |                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| • Caudal óptimo de circulación        | (gpm)     |
| • Caída de presión óptima en la broca | (psi)     |
| • Diámetro de primera boquilla        | (1/32 pg) |
| • Diámetro de segunda boquilla        | (1/32 pg) |
| • Diámetro de tercera boquilla        | (1/32 pg) |
| • Caída de presión en la broca        | (psi)     |
| • Fuerza de impacto hidráulico        | (lb)      |
| • Potencia hidráulica en la broca     | (hp)      |

- Energía específica en la broca (hp/pg<sup>2</sup>)
- Densidad equivalente de circulación (lb/gl)
- Número de Reynolds del fluido en el espacio anular entre el hueco y tubería pesada
- Número de Reynolds Crítico para flujo turbulento en espacio anular entre el hueco y tubería pesada

### **3.5. RESULTADOS DE EJEMPLO DE APLICACION DEL PROGRAMA**

Se describen los datos generales de la aplicación de diseño de hidráulica efectuada para la perforación del pozo 161D-Chambira :

- Bombas de superficie : tres (3) OIME H-700B
- Máxima velocidad en golpes por minuto : 100 spm
- Longitud de carrera : 10"
- Camisa de 4-1/2" : 2.07 gl/golpe
- Camisa de 5" : 2.55 gl/golpe
- Máxima presión nominal camisa 4-1/2" : 3485 psi
- Máxima presión (90 %) camisa 4-1/2" : 3136 psi
- Máxima presión nominal camisa 5" : 2823 psi
- Máxima presión (90 %) camisa 5" : 2540 psi
- Eficiencia volumétrica calculada de bombas : 95 %

La impresión de datos empleados y resultados obtenidos de la aplicación de las nueve alternativas de diseño de hidráulica de perforación para el pozo 161D-Chambira se presentan en los anexos adjuntos.

## **4. PROGRAMA PARA DETERMINAR DIAMETROS OPTIMOS DE BOQUILLAS DE BROCA**

### **4.1. SUMARIO DEL TRABAJO**

El programa utiliza regresión lineal en coordenadas logarítmicas de caudales y presiones reducidas de circulación de un pozo en perforación para calcular los parámetros **k-u** de la ecuación  $P_c = kQ^u$ . Dicha ecuación representa las pérdidas de presión en el sistema de circulación excluida la broca.

Luego con las relaciones matemáticas de optimización hidráulica demostradas por Kendall-Goins<sup>7</sup>-Robinson<sup>11</sup> y parámetros **k-u** para cada método de optimización se determinan los valores óptimos de factor de presión y pérdida de presión en la broca, caudal de flujo del fluido de perforación, diámetros de boquillas, fuerza de impacto, potencia hidráulica y energía específica en la broca.

El programa se emplea para optimizar la hidráulica para la siguiente carrera de broca de un pozo en perforación. Además, el valor del exponente **u** puede ser usado con el programa **HIDRA** para revisar el pronóstico de hidráulica para un pozo en perforación o un pozo próximo a ser perforado.

### **4.2. ANTECEDENTES DE METODOS DE OPTIMIZACION DE HIRAUICA**

Kendall y Goins<sup>7</sup> realizaron la demostración matemática de los métodos de optimización de máxima potencia hidráulica en la broca y máxima fuerza de impacto hidráulico en el fondo del pozo, estableciendo las bases del uso eficiente de la energía hidráulica y de selección de diámetros de boquillas de broca.

Scott<sup>10</sup> desarrolló un método para determinar los diámetros óptimos de boquillas eliminando la necesidad de usar valores asumidos para el exponente **u** de pérdidas de presión en el sistema de circulación. El método supone que en la siguiente carrera de broca se emplearán los mismos valores de densidad de lodo y presión de bomba que en la carrera anterior.

Robinson <sup>11</sup> presentó una técnica gráfica para determinar los tamaños óptimos de boquillas para máximas potencia hidráulica y fuerza de impacto a partir del cálculo del exponente  $u$  de pérdidas de presión por fricción. Posteriormente, Goins y Flak <sup>12</sup> mostraron un método gráfico para calcular los tamaños óptimos de boquillas que elimina la suposición efectuada por Scott sobre los valores de densidad de lodo y presión de bomba.

La mayor dificultad en lograr el empleo amplio de métodos matemáticos para la selección de boquillas es la necesidad de encontrar métodos de solución rápida acorde con el tiempo o concentración que pueda disponer el personal de campo.

Todavía hay diferencias de opinión sobre cuál método debería ser empleado para optimizar la hidráulica de perforación; es decir, determinar los valores óptimos de caudal y diámetros de boquillas de broca para efectuar la mejor remoción de recortes perforados debajo de la broca que resulte en el mayor incremento de la velocidad de penetración.

#### **4.3. DETERMINACION DE PARAMETROS DE ECUACION $P_C = KQ^u$**

##### **4.3.1. ANTECEDENTES DE TECNICAS DE CALCULO**

Las pérdidas de presión por fricción que ocurren en el sistema de circulación de lodo sin considerar la broca se expresan mediante la siguiente ecuación

$$P_C = kQ^u$$

El exponente  $u$  es igual a 1 cuando el flujo es laminar y es igual a 2 cuando el flujo es completamente turbulento. En los sistemas de circulación del fluido de perforación la mayor parte del flujo es turbulento; es decir, que normalmente el exponente se acerca más a 2.

La expresión de las pérdidas de presión por fricción mediante la ecuación anterior permitió la demostración matemática de las condiciones de máxima potencia hidráulica y máxima fuerza de impacto efectuadas por Kendall-Goins <sup>7</sup> y luego Robinson <sup>11</sup>

Kendall-Goins asumieron el valor de  $u=1.9$ . Con este valor de  $u$  la potencia hidráulica es

máxima cuando 66 % de la presión de superficie se emplea en la broca, mientras que la fuerza de impacto es máxima cuando 49 % de la presión de superficie se emplea en la broca. Los programas para calculadoras preparados por las compañías fabricantes de brocas asumen  $u=1.86$  ó  $1.82$ .

El trabajo de Scott <sup>10</sup> demuestra que no es necesario usar un valor asumido para  $u$ . Para cada caudal de flujo se determina la presión reducida de circulación. Los caudales y presiones reducidas de circulación se grafican en un gráfico de escala logarítmica, siendo  $u$  la pendiente de la línea que conecta los puntos. El trabajo de Scott demuestra que  $u$  varía con las propiedades del fluido de perforación y es con frecuencia diferente del valor asumido en el trabajo de Kendall y Goins.

Hasta fines de la década de 1960 las únicas técnicas prácticas para calcular los diámetros de boquillas de brocas eran emplear tablas o gráficos. A partir de la década de 1970 las técnicas gráficas de Scott y Robinson facilitaron la resolución de determinar los diámetros óptimos de boquillas.

En la década de 1980 los métodos de Kendall-Goins, Scott y Robinson fueron empleados con calculadoras programables. La técnica de Kendall-Goins se utilizó para diseñar la hidráulica de perforación, mientras que el método de Robinson con dos datos de caudal de flujo y presión se empleó para determinar los tamaños de boquillas para la siguiente carrera de broca.

Las compañías de brocas y fluidos de perforación han desarrollado programas de microcomputadoras para efectuar el diseño de hidráulica para pozos próximos a ser perforados. Sin embargo, pocos programas consideran los métodos de Scott-Robinson-Goins para optimizar la hidráulica de perforación.

#### **4.3.2. APLICACION DE METODO DE MINIMOS CUADRADOS**

Las pérdidas de presión por fricción en el sistema de circulación de lodo sin considerar la broca se expresan mediante la siguiente ecuación : <sup>11</sup>

$$P_c = kQ^u$$

Esta pérdida de presión también es igual a la presión de superficie menos la caída de presión en la broca

$$P_c = P_s - P_b = kQ^u$$

Aplicando la función logaritmo se tiene

$$\log(P_s - P_b) = u \log(Q) + \log(k)$$

Sea P el número de pares de datos de caudales y presiones de superficie que se obtienen de la prueba de circulación efectuada con la broca empleada en perforar el pozo. Los valores de caída de presión en la broca se determinan con las fórmulas correspondientes indicadas en la sección 4.4.1..

Aplicando la técnica de regresión lineal a dichos P puntos se determina la línea recta de ajuste cuya ecuación es  $y = ax + b$ . Las relaciones de caudales y presiones reducidas de circulación con las variables de regresión lineal en coordenadas logarítmicas son las siguientes :

$$x = \log(Q)$$

$$y = \log(P_s - P_b)$$

Donde :

- **Q** es caudal de flujo de fluido de perforación, gpm
- **x** es logaritmo natural de caudal de flujo
- **P<sub>s</sub>** es presión de superficie, psi
- **P<sub>b</sub>** es caída de presión en la broca, psi
- **P<sub>s</sub> - P<sub>b</sub>** es presión reducida de circulación
- **y** es logaritmo natural de (**P<sub>s</sub> - P<sub>b</sub>**)
- **b** es logaritmo natural de k

Las fórmulas indicadas en las secciones 2.6.1.-2.6.2. y 2.6.3. se emplean para determinar los parámetros **c**, **a** y **b** de regresión lineal con los resultados siguientes : <sup>2-11</sup>

- El parámetro **c** es el coeficiente de correlación e indica la desviación normal de los puntos. Cuanto más se acerca a 1 indica mejor ajuste de la regresión.
- Los parámetros **a** y **b** son la pendiente e intercepción con el eje de ordenadas de la línea recta de regresión lineal en coordenadas logarítmicas.

$b = \log(k)$ , donde log es la función logaritmo natural

$k = \exp(b)$ , donde exp es la función exponencial

$u = a$

#### **4.4. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA**

Este trabajo presenta el programa de computadora **BOQUI** para calcular los diámetros óptimos de boquillas de broca mediante los métodos desarrollados por Scott<sup>10</sup>-Robinson<sup>11</sup>-Goins<sup>12</sup>.

El programa **BOQUI** está elaborado en lenguaje BASIC para microcomputadora y compilado para ser ejecutado desde el indicador del DOS en computadoras con sistema operativo DOS y con el comando Ejecutar en computadoras con sistema operativo Windows.

El programa calcula las presiones reducidas de circulación con los datos de densidad de lodo, diámetros de boquillas, caudales y presiones de superficie obtenidos de prueba de circulación realizada con la broca que se emplea en perforar el pozo. Luego mediante regresión lineal en coordenadas logarítmicas de caudales y presiones reducidas de circulación determina los parámetros **k-u** de la ecuación  $P_c = kQ^u$ .

Luego con las ecuaciones de optimización demostradas en las secciones **3.3.1.-3.3.2.** y **3.3.3.** calcula los valores óptimos de factor de presión en la broca, caudal de flujo, diámetros de boquillas, fuerza de impacto, potencia hidráulica y energía específica en la broca.

#### 4.4.1. FORMULAS EMPLEADAS

La nomenclatura de variables y parámetros es la siguiente :

- $D_b$  = diámetro de la broca (pg)
- $D_h$  = diámetro del hueco del pozo (pg)
- $D_p$  = diámetro externo de la tubería (pg)
- $w$  = densidad del lodo (lb/gln)
- $PV$  = viscosidad plástica del lodo (cp)
- $YP$  = punto de cedencia del lodo (lbf/100 p<sup>2</sup>)
- $Q$  = caudal de flujo (gpm)
- $V$  = velocidad promedio de flujo (pps)
- $Y1;Y2;Y3$  = diámetro de las boquillas (1/32 pg)
- $A$  = área total de boquillas (pg<sup>2</sup>)
- $P_b$  = caída de presión en la broca (psi)
- $A_b$  = área transversal de la broca (pg<sup>2</sup>)
- $V_b$  = velocidad de flujo en las boquillas (pps)
- $FI$  = fuerza de impacto hidráulico (lbf)
- $HP_b$  = potencia hidráulica en la broca (hp)
- $EB$  = energía específica en la broca (hp/pg<sup>2</sup>)

Las fórmulas empleadas en el programa son las siguientes : <sup>9-11</sup>

- **Velocidad promedio de flujo en el espacio anular**

$$V = \frac{Q}{2.448 (D_h^2 - D_p^2)}$$

- **Area total de las boquillas de la broca**

$$A = \frac{0.7854}{(32)^2} [(Y1)^2 + (Y2)^2 + (Y3)^2]$$

- Velocidad de flujo en las boquillas de la broca

$$V_b = \frac{0.32086 Q}{A}$$

- Caída de presión en la broca

$$P_b = \frac{w Q^2}{10858 A^2}$$

- Fuerza de impacto hidráulico en fondo del hueco

$$FI = \frac{w Q V_b}{1932}$$

- Potencia hidráulica gastada en la broca

$$HP_b = \frac{Q P_b}{1714}$$

- Area transversal de la broca

$$A_b = 0.7854 (D_b)^2$$

- Energía específica en la broca

$$EB = \frac{HP_b}{A_b}$$

- Mínimo caudal de circulación de lodo según Fullerton <sup>13</sup>

$$Q = \frac{481 (D_h^2 - D_p^2)}{w D_h}$$

#### 4.4.2. DATOS REQUERIDOS

Cuando se ejecuta el programa se presenta la siguiente lista de alternativas de selección :

- ( 1 ) Datos de boquillas, presiones y caudales
- ( 2 ) Calcular hidráulica óptima en la broca
- ( 3 ) Imprimir resultados
- ( 4 ) Terminar programa

Para la alternativa (1) de datos de densidad del lodo, diámetros de boquillas, presiones de superficie y caudales es necesario aceptar los datos propuestos o ingresar nuevos datos :

- Nombre del pozo
- Peso actual de lodo (lb/gl)
- Peso próximo de lodo (lb/gl)
- Diámetro externo de la tubería de perforar (pg)
- Diámetro de la broca (pg)
- Diámetro de primera boquilla (1/32 pg)
- Diámetro de segunda boquilla (1/32 pg)
- Diámetro de tercera boquilla (1/32 pg)
- Primera presión de superficie (psi)
- Segunda presión de superficie (psi)
- Tercera presión de superficie (psi)
- Cuarta presión de superficie (psi)
- Primer caudal de flujo (gpm)
- Segundo caudal de flujo (gpm)
- Tercer caudal de flujo (gpm)
- Cuarto caudal de flujo (gpm)
- Número de puntos de regresión ( )
- Primera presión máxima de superficie (psi)
- Segunda presión máxima de superficie (psi)
- Primer caudal variable de flujo (gpm)
- Segundo caudal variable de flujo (gpm)

#### 4.4.3. DESCRIPCION DE LOS ALGORITMOS DE CALCULO

El procedimiento de cálculo empleado en el programa **BOQUI** es el siguiente

- El programa recupera los datos de densidad del lodo, diámetros de boquillas, presiones de superficie y caudales de flujo del archivo **BOQUILLA .DAT**. Se presentan las alternativas de ingresar nuevos datos y de no modificar los datos propuestos.

Los datos de caudales de flujo y presiones de superficie se obtienen de la prueba de circulación a diferentes caudales que se realiza antes de iniciar la carrera para retirar la broca empleada en la perforación del pozo.

- Con los datos de densidad del lodo, diámetros de boquillas y caudales de flujo se calculan las caídas de presión en la broca y las presiones reducidas de circulación, con las fórmulas indicadas en la sección **4.4.1.**

La presión reducida de circulación es la presión de superficie menos la caída de presión en la broca.

- Los datos de caudales y presiones reducidas de circulación son sometidos a regresión lineal en coordenadas logarítmicas mediante las relaciones de regresión indicadas en las secciones **2.6.1.-2.6.2.** y **2.6.3.**

Con esta regresión lineal se determinan los parámetros **k-u** de la ecuación  $P_c = kQ^u$  de pérdidas de presión por fricción en el sistema de tuberías y espacios anulares.

- Con el exponente **u** y las relaciones de optimización derivadas en las secciones **3.3.2.-3.3.3.** y **3.3.4.** se determinan los factores óptimos de pérdida de presión en la broca entre presión de superficie para los métodos de máxima potencia hidráulica y máxima fuerza de impacto.
- Con los parámetros **k-u**, factor óptimo de presión y máxima presión de superficie se determinan los valores óptimos de caída de presión en la

broca, pérdida de presión en el sistema de tuberías de circulación y caudal de flujo.

- Para los métodos de máxima potencia hidráulica y máxima fuerza de impacto se determinan los siguientes parámetros con las fórmulas indicadas en la sección 4.4.1. : diámetros óptimos de boquillas, caída de presión en la broca, velocidad de flujo en las boquillas, fuerza de impacto, potencia hidráulica y energía específica en la broca.

También se calculan estos parámetros hidráulicos para las condiciones de mínimo caudal de circulación de Fullerton y caudal variable.

#### **4.4.4. RESULTADOS OBTENIDOS**

Los resultados que se obtienen son los siguientes

- Coeficiente de correlación
- Pendiente de la recta de regresión
- Intercepción con eje de logaritmo de presión reducida
- Factor de presión en la broca para hidráulica actual
- Factor óptimo de presión en la broca para máxima potencia hidráulica
- Factor óptimo de presión en la broca para máxima fuerza de impacto 1
- Factor óptimo de presión en la broca para máxima fuerza de impacto 2

Para las condiciones de la hidráulica actual, máxima potencia hidráulica, máxima fuerza de impacto 1 y máxima fuerza de impacto 2, caudal mínimo de circulación de Fullerton y caudal de flujo variable se determinan los siguientes parámetros

- Caudal óptimo de circulación (gpm)
- Caída de presión óptima en la broca (psi)
- Diámetro de primera boquilla (1/32 pg)

- Diámetro de segunda boquilla (1/32 pg)
- Diámetro de tercera boquilla (1/32 pg)
- Caída de presión en la broca (psi)
- Velocidad de flujo en las boquillas (pps)
- Fuerza de impacto (lb)
- Potencia hidráulica en la broca (hp)
- Energía específica en la broca (hp/pg<sup>2</sup>)

#### **4.5. RESULTADOS DE EJEMPLO DE APLICACION DEL PROGRAMA**

Se describen los datos necesarios y resultados para la aplicación efectuada en la perforación del pozo 158D-Chambira :

- Fecha : 27 de agosto de 1995
- Broca empleada en perforar el pozo : diamante policristalino compacto de 12-1/4" DS40HF+
- Diámetros de boquillas : 3 x 15/32" y 1 x 16/32"
- Formación : Chambira
- Profundidad : 2696 m
- Perforación direccional con conjunto de fondo y registrador Slim-1 del sistema MWD
- Bombas de superficie : tres (3) OIME H-700B
- Máxima velocidad en golpes por minuto : 100 spm
- Longitud de carrera : 10"
- Galones por golpe para camisa 4-1/2" : 2.07 gl/golpe
- Máxima presión nominal camisa 4-1/2" : 3485 psi
- Máxima presión (90 %) camisa 4-1/2" : 3136 psi
- Eficiencia volumétrica calculada de bombas : 95 %
- Densidad del fluido de perforación : 10.4 lbm/gl
- Mediante prueba de presiones realizada en el viaje de cañería se determinó 220 psi de caída de presión ocasionada por el registrador Slim-1.
- Diámetro equivalente de boquillas : 3 x 17.6/32"

- Los caudales y presiones de superficie son los siguientes :

spm	caudal (gpm)	presión sup. (psi)	presión sup. neta (psi)
295	580	3100	2880
276	543	2800	2580
257	505	2500	2280
238	468	2200	1980

La impresión de los datos empleados y resultados obtenidos con el programa de la aplicación efectuada para el pozo 158D-Chambira se presentan en los anexos adjuntos.

Se recomendó emplear 2 boquillas de 14/32" y 2 de 15/32", cuya área total es equivalente al área de una boquilla de 16/32" más 2 de 17/32". Con estas boquillas y 590 gpm de caudal para 3100 psi de presión de superficie, la energía específica en la broca aumentaría de 1.8 a 2.38 hp/pg<sup>2</sup> (32 % de incremento).

La velocidad de las 3 bombas H-700B fue regulada hasta que se alcanzara 100 spm en cada bomba ó 3100 psi de máxima presión. El resultado real cuando se reinició la perforación del pozo fue que con 300 spm (total 590 gpm) se tuvo 3100 psi en superficie, demostrando la validez de datos y resultados.

El aumento de la energía específica en la broca de 1.8 a 2.38 hp/pg<sup>2</sup> (32 % más) permitió aplicar mejores parámetros de peso sobre la broca y velocidad de rotación con la broca de 12-1/4" DS40HF+, obteniéndose que la velocidad de penetración incrementó de 6 a 12 m/hr para la misma litología de formación.

## **5. PROGRAMA PARA CALCULAR PROPIEDADES REOLOGICAS Y CAUDAL CRITICO DE LECHADAS DE CEMENTO**

### **5.1. SUMARIO DEL TRABAJO**

El programa se basa en las ecuaciones que describen el comportamiento de flujo de los modelos de fluido Plástico Bingham y Ley de Potencia aplicadas a lechadas de cemento.

Mediante relaciones matemáticas de regresión lineal en coordenadas cartesianas y logarítmicas de velocidades de corte y esfuerzos de corte de la prueba de reología de lechada de cemento, el programa determina los valores de la pendiente **a** e intercepción **b** de la ecuación **y=ax+b** y de las propiedades reológicas de flujo de la lechada de cemento : <sup>2-14</sup>

- Modelo de fluido Plástico Bingham
  - Coeficiente de correlación
  - Viscosidad plástica
  - Punto de cedencia
  
- Modelo de fluido Ley de Potencia
  - Coeficiente de correlación
  - Indice de comportamiento de flujo
  - Indice de consistencia

Luego se determinan los siguientes parámetros para la lechada de cemento en el espacio anular entre el hueco y la tubería

- Flujo turbulento para modelos de fluido Plástico Bingham y Ley de Potencia
  - Número de Reynolds Crítico
  - Caudal crítico de desplazamiento
  - Velocidad equivalente de corte en RPM

- Flujo tapón para modelos de fluido Plástico Bingham y Ley de Potencia
  - Número de Reynolds Crítico
  - Caudal crítico de desplazamiento
  - Velocidad equivalente de corte en RPM

El programa se emplea para calcular propiedades reológicas y caudal crítico de flujo turbulento de lechadas de cemento para cementación primaria de tuberías. Este caudal crítico es el mínimo caudal al cual debe ser desplazado el cemento para obtener la mayor eficiencia de remoción de lodo del espacio anular entre el hueco y la tubería, contribuyendo a obtener mejores resultados en trabajos de cementación primaria.

## **5.2. FUNDAMENTOS DE CEMENTACION**

### **5.2.1. PROCESO DE CEMENTACION**

La cementación de pozos de petróleo es el proceso de mezclar cemento con agua y bombear la lechada de cemento al pozo a través de una tubería de revestimiento de acero a puntos críticos en el espacio anular alrededor de la tubería o en hueco abierto debajo de la tubería. <sup>16</sup>

Las funciones del proceso de cementación primaria son

- Restringir el movimiento de fluidos entre las formaciones
- Adherencia y soporte de la tubería de revestimiento
- Proteger la tubería de la corrosión
- Impedir reventones de pozo mediante sellos rápidos
- Proteger la tubería de cargas de impacto en perforación profunda
- Obturar zonas de pérdida de circulación

## **5.2.2. MANUFACTURA Y QUIMICA DEL CEMENTO**

### **5.2.2.1. MANUFACTURA**

Los materiales básicos usados para fabricar cementos Portland son caliza, arcilla y lutita. Con frecuencia se agregan hierro y alúmina si estos están presentes en cantidades insuficientes en la arcilla y lutita. Dichos materiales son mezclados juntos, húmedos o secos, y colocados en un horno rotario, en donde la lechada de caliza es fundida a 2600°-3000°F de temperatura en un material llamado clinker (escoria) de cemento. <sup>16</sup>

Después de su enfriamiento, el clinker es pulverizado en las fábricas de molienda y mezclado con una pequeña cantidad de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para retardar el tiempo de fraguado y aumentar el esfuerzo de compresión final.

El nombre de "cemento Portland" fue escogido por Joseph Aspdin, inventor de su proceso de manufactura, porque pensó que el sólido producido se parecía a una piedra de cantera de la Isla de Portland fuera de la costa de Inglaterra .

### **5.2.2.2. QUIMICA**

La química del cemento es muy compleja y su rendimiento en pozos usualmente se define por análisis de óxidos y ensayos de propiedades de tiempo de bombeabilidad, resistencia de compresión, reología, etc.

Cuando el cemento es mezclado en el sitio de trabajo del pozo, el agua funciona como portador de los silicatos reactivos producidos en el proceso de fabricación. Una vez en el lugar definitivo pozo abajo, una estructura plástica entrecruzada desarrolla resistencia de gel, resultando finalmente en una masa sólida fraguada.

Los químicos de cemento indican que hay cuatro compuestos cristalinos en el clinker que se hidratan para formar o ayudar en la formación de la estructura rígida. Esas principales fases cristalinas son las siguientes : <sup>16-3</sup>

- Aluminato tricálcico (C3A)  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

- Silicato tricálcico (C3S) :  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
- Silicato dicálcico (C2S) :  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
- Aluminoferrita tetracálcico (C4AF) :  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$

La reacción de hidratación de los compuestos C3S, C2S, C3A, C4AF es una reacción exotérmica y genera una considerable cantidad de calor, especialmente la hidratación de C3A. Las reacciones de hidratación de los componentes del cemento cuando son mezclados con agua son representadas por ecuaciones químicas.

El principal componente de cemento en los productos de reacción es  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , el cual es llamado tobermorita gel. Esta tobermorita gel tiene un tamaño de partícula extremadamente fino y por consiguiente una gran área superficial. Las intensas fuerzas de atracción de superficie causan que el gel adsorba todos los cristales y partículas y se una a ellos; el exceso de agua que no es hidratada reduce la resistencia del cemento haciéndolo más poroso y permeable.

El silicato tricálcico (C3S) es considerado el mayor contribuyente a la resistencia de compresión del cemento, especialmente en los primeros 28 días de fraguado. El silicato dicálcico (C2S) se hidrata ligeramente y contribuye a la resistencia de periodo largo. El aluminato tricálcico (C3A) hidrata muy rápidamente y produce la mayor parte del calor de hidratación observado durante los primeros días.

El yeso añadido al clinker de cemento antes de su molienda controla la hidratación rápida del C3A. La porción de C3A del cemento también es atacada rápidamente por agua que contiene sulfatos. El aluminoferrita tetracálcico (C4AF) tiene sólo efectos menores en las propiedades físicas del cemento.

### **5.2.3. CLASIFICACION Y PROPIEDADES DE CEMENTOS**

#### **5.2.3.1. CLASIFICACION**

Los cementos Portland son fabricados para satisfacer ciertas normas físicas y químicas que dependen de su aplicación. En Estados Unidos de América las entidades que mejor conocen la industria del petróleo son la American Society Testing Materials (ASTM) y el

American Petroleum Institute (API). La ASTM escribe normas para cementos usados en construcción, mientras que el API establece normas para cementos empleados en pozos de petróleo. Las especificaciones para cemento de ambos grupos son preparadas por representantes de fabricantes y usuarios.

La ASTM suministra especificaciones para cinco tipos de cemento Portland : tipos I, II, III, IV y V. Estos cementos son fabricados para uso en condiciones atmosféricas.

Los cementos para pozos de petróleo y gas son fabricados para amplios rangos de temperaturas y presiones. El API establece normas que cubren ocho clases de cemento para pozos de petróleo : A, B, C, D, E, F, G, H. Estas clasificaciones están descritas en la Norma 10 - Especificaciones para Cementos y Aditivos para Pozos Petroleros.<sup>16-14</sup>

Los cementos API de clases A, B y C corresponden a cementos ASTM de tipos I, II y III, respectivamente. Los cementos ASTM de tipos IV y V no tienen correspondencia con cementos API.

Los cementos API clase B son fabricados para uso desde superficie hasta 6000 pies cuando se requiere moderada a alta resistencia a sulfatos. Los cementos API clases G y H son cementos básicos que están destinados para uso desde superficie hasta 8000 pies y pueden ser empleados con aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades y temperaturas de fondo. Se fabrican en tipos de moderada y alta resistencia a sulfatos.

### **5.2.3.2. PROPIEDADES**

En operaciones de completación de pozos, los cementos son usados para desplazar el fluido de perforación y llenar el espacio anular entre la tubería y el hueco abierto. Para cumplir este objetivo, los cementos son diseñados para condiciones de fondo que varían entre superficie y 30 mil pies de profundidad, donde el rango de temperaturas varía entre debajo del punto de congelamiento del agua en regiones polares y 700°F en pozos perforados para producción de energía geotermal.

Las especificaciones de API no cubren todas las propiedades de cementos sobre tales amplios rangos de profundidad, temperatura y presión. Sin embargo, establecen las pro-

propiedades físicas y químicas de diferentes clases de cementos que pueden ajustarse con la mayoría de las condiciones de pozo. Para cada clase de cemento esas especificaciones incluyen :

- Análisis químicos
- Contenido de agua libre
- Finura o área superficial específica
- Esfuerzo de compresión
- Tiempo de espesamiento

Aunque esas propiedades describen cementos para propósitos específicos, los cementos para pozos de petróleo debieran tener otras propiedades y características para cumplir sus funciones necesarias hechas abajo.

Los requerimientos químicos y físicos de cementos están definidos en la Norma API 10. Dichos requerimientos y propiedades físicas se indican en los anexos adjuntos.

#### **5.2.4. ADITIVOS DE CEMENTACION**

Actualmente los pozos petroleros cubren un rango amplio de condiciones de profundidad y temperatura que en cualquier otro tiempo anterior. Las condiciones más severas son temperaturas debajo del punto de congelamiento del agua en Alaska y Canadá, 1500-2000°F en pozos incendiados por fuego, 30 mil psi y 500°F en pozos extremadamente profundos.

Ha sido posible acomodar las lechadas de cemento para un rango amplio de condiciones mediante el desarrollo de aditivos que modifican los cementos Portland para los requerimientos individuales de cada pozo. Desde que se empezó a usar cementos básicos clases G y H y equipos de mezclado de mejor tecnología y mayor capacidad, es más flexible y simple el uso de aditivos.

Los aditivos de cementación pueden afectar las propiedades y características de las lechadas de cemento como sigue <sup>16</sup>

- La densidad puede variar de 6.0 a 21.0 lbm/gal

- El esfuerzo de compresión puede variar entre 200 a 20,000 psi
- El tiempo de fraguado puede ser acelerado o retardado para producir un cemento que fraguará en pocos minutos o permanecerá fluido hasta por 36 horas
- El filtrado del cemento puede ser disminuído tan bajo como 25 cm<sup>3</sup>/30 min cuando se mide a través de una malla 325 mesh a 1000 psi de presión diferencial
- Las propiedades de flujo de las lechadas de cemento pueden fluctuar sobre un amplio rango de valores
- El cemento fraguado puede ser resistente a la corrosión por aumento de la densidad de mezcla o por cambio de su composición química
- La pérdida de lechadas de cemento en las formaciones puede ser controlada mediante agentes de taponamiento granulares, fibrosos o escamas y agentes gelificantes
- La elasticidad puede ser impartida al cemento fraguado por incorporación de materiales fibrosos finos en la composición de la lechada
- La permeabilidad del cemento puede ser controlada en pozos de baja temperatura por incremento de densidad y a temperaturas mayores que 230°F por aumento de densidad de la lechada y empleo de sílica flour
- Los costos pueden ser reducidos, dependiendo de los requerimientos del pozo y propiedades deseadas
- Durante el fraguado el cemento puede ser expandido ligeramente mediante el empleo de yeso o cloruro de sodio
- El calor de hidratación, el calor liberado durante el proceso de fraguado, puede ser controlado mediante el uso de arena, fly ash (ceniza) o bentonita en combinación con agua

Los aditivos de cemento son clasificados como sigue

- Aceleradores de tiempo de fraguado
- Aditivos para disminuir densidad
- Aditivos para aumentar densidad

- Retardadores de tiempo de fraguado
- Agentes de control de pérdidas de circulación
- Agentes de control de filtrado
- Reductores de fricción
- Materiales especiales

### **5.2.5. FACTORES PARA DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTO**

Antes que una lechada de cemento sea bombeada en un pozo, deben efectuarse diversas pruebas de laboratorio para asegurar la colocación apropiada del cemento y para tratar de predecir su comportamiento cuando es bombeado y después que es colocado en el pozo. Para el diseño de composición de una lechada de cemento se deben considerar profundidades, temperaturas, condiciones del hueco y problemas de perforación del pozo.

Los siguientes factores afectan el diseño de lechadas de cemento : <sup>16</sup>

- Profundidad del pozo
- Temperatura del pozo
- Presión de la columna de lodo
- Viscosidad y contenido de agua de la lechada
- Tiempo de espesamiento o bombeabilidad
- Resistencia requerida de cemento para soportar la tubería
- Calidad del agua de mezcla disponible
- Tipo de fluido de perforación
- Tipos de aditivos empleados en el lodo
- Densidad de la lechada de cemento
- Calor de hidratación
- Permeabilidad del cemento fraguado
- Control de filtrado
- Resistencia a salmueras de hueco abajo

### **5.3. IMPORTANCIA DE CEMENTACION PRIMARIA DE TUBERIAS**

La operación más importante realizada en un pozo es el trabajo de cementación primaria en la etapa de completación. Se debe alcanzar aislamiento zonal completo en el hueco del pozo; esto es, obtener sello hidráulico entre cemento y tubería y entre cemento y formación, eliminando canales de lodo o gas dentro de la cubierta de cemento.

La remoción efectiva del lodo por cemento es un factor crítico en trabajos de cementación primaria. La causa principal de fracasos son canales de lodo gelificado dejados por el cemento en el espacio anular, resultando en deficiente aislamiento de zonas que puede ser muy costoso en la vida productiva del pozo.

Para obtener un buen trabajo de cementación se requiere realizar considerable esfuerzo conjunto de todo el personal involucrado. Es necesario efectuar los mayores esfuerzos en la perforación del pozo, registros eléctricos a hueco abierto, bajada de la tubería, circulación y acondicionamiento del lodo antes de cementar, mezclado del cemento, desplazamiento, anclaje de tapones y tiempo de espera de fraguado de cemento.

Los factores de control de calidad de un trabajo de cementación primaria que pueden ser controlados en el sitio del pozo por el ingeniero son : <sup>17-18</sup>

- Colocación de centralizadores y rascadores
- Ajuste de propiedades del lodo, caudal y tiempo de circulación del lodo antes de cementar
- Movimiento de la tubería o lina
- Uso de lavadores y espaciadores
- Caudal de desplazamiento del cemento

#### **5.3.1. FACTORES PARA PLANIFICAR TRABAJOS DE CEMENTACION**

Muchos factores determinan el éxito o fracaso de un trabajo de cementación primaria de tubería. La planificación debe realizarse días, semanas o meses antes de perforar el pozo.

Los factores que se deben considerar para planificar trabajos de cementación primaria de tuberías son los siguientes : <sup>16</sup>

- **Hueco del pozo**

- Diámetro
- Profundidad
- Temperatura
- Desviación
- Propiedades de formación

- **Fluido de perforación**

- Tipo
- Propiedades
- Peso
- Compatibilidad con el cemento

- **Tubería de revestimiento**

- Diseño y tamaño de la tubería
- Profundidad de sentado
- Equipos de flotación
- Centralizadores
- Rascadores
- Herramientas para cementación en etapas

- **Operaciones del equipo de perforación**

- Tiempo y velocidad de bajada de la tubería
- Tiempo de circulación antes de cementar

- **Composición de lechada de cemento**

- Tipo de cemento
- Volumen de cemento
- Densidad de mezcla

- Aditivos de cementación
- Propiedades
- Mezclado
- Pruebas de cemento con agua de locación

- **Unidades de mezclado y bombeo**

- Tipo de mezclador
- Cabeza de cementar
- Tapones
- Espaciadores
- Movimiento de tubería durante la cementación
- Fluidos de desplazamiento

- **Personal**

### **5.3.2. PROBLEMAS OCASIONADOS POR DEFICIENTES TRABAJOS DE CEMENTACION PRIMARIA**

Los fracasos en conseguir aislamiento entre zonas productivas pueden conducir a :

- Inefectivos tratamientos de estimulación
- Evaluación inapropiada del reservorio
- Comunicación anular con fluidos de pozo no deseados
- Levantamiento de excesivos fluidos de pozo
- Acumulación de gas en el anillo
- Problemas de corrosión

Los problemas de corrosión en pozos, los cuales aparecen en etapas posteriores de producción, son resultado de malos trabajos de cementación. Los huecos de corrosión en tuberías pueden ser reparados solamente por costosos y posiblemente perjudiciales trabajos de reacondicionamiento.

### **5.3.3. FACTORES QUE CONTRIBUYEN EN DEFICIENTES TRABAJOS DE CEMENTACION PRIMARIA**

Los problemas y posibles causas que contribuyen en fracasos de trabajos de cementación primaria son los siguientes : <sup>16</sup>

- **Fraguado prematuro de la lechada de cemento en la tubería**

- Contaminantes en el agua de mezcla
- Estimación incorrecta de la temperatura
- Deshidratación del cemento en el anillo
- Uso de cemento inapropiado
- Taponamiento del zapato o collar flotador
- Insuficiente retardador

- **Fracaso para anclar el tapón de tope**

- Retención del tapón en la cabeza de cementar
- Corrida del tapón de tope en el fondo
- Falta de disponibilidad para compresión
- Incorrectos cálculos de desplazamiento

- **Mezclado incompleto de la lechada de cemento**

- Falla mecánica de los equipos
- Insuficiente agua de mezcla o presión
- Fracaso de la planta de mezclado

- **Escape de gas en el anillo**

- Insuficiente presión hidrostática
- Gelificación de la interfase cemento-lodo
- Fracaso del cemento para cubrir arenas de gas
- Deshidratación del cemento

- **Canalización**

- Contacto de la tubería con formación
- Inadecuadas propiedades del lodo (altas viscosidad plástica y punto de cedencia)
- Fracaso para mover la tubería
- Bajos caudales de desplazamiento
- Huecos fuera de calibre (agrandados)

- **Muy rápido fraguado de cemento**

- Inapropiada relación de agua-cemento
- Estimación incorrecta de la temperatura
- Problemas mecánicos
- Cemento o aditivos equivocados para las condiciones de pozo
- Agua de mezcla caliente
- Lechada de cemento permaneció estática para realizar operaciones del equipo
- Selección inadecuada de espaciadores para lodo-cemento

#### **5.4. OPTIMIZACION DE CEMENTACION PRIMARIA DE TUBERIAS**

El desplazamiento efectivo del fluido de perforación por cemento es un factor crítico en la completación exitosa de pozos de petróleo. Los fracasos en la cementación primaria son predominantemente causados por canales de lodo gelificados dejados por el cemento en el espacio anular. Si los canales de lodo son eliminados, cualquier número de composiciones de cemento suministrarán sellos hidráulicos efectivos.

La optimización de los factores de desplazamiento mejora la probabilidad de obtener buenos resultados en trabajos de cementación primaria de tuberías. Es significativo que esencialmente todos los modelos de estudios y trabajos publicados destacan los mismos factores durante este periodo crítico de desplazamiento del fluido de perforación por cemento.

En la evaluación de factores que afectan la remoción de lodo es necesario considerar los patrones de flujo en un espacio anular excéntrico, en donde la tubería está más cerca de un lado de la pared del hueco que del otro. En un anillo excéntrico la velocidad de flujo no es uniforme y la más alta velocidad ocurre en el lado del hueco con mayor área de flujo.

Si la tubería está cerca a la pared del hueco, puede no ser posible bombear cemento a altos caudales de flujo suficientes para desarrollar flujo uniforme a través del hueco completo.

Estudios de campo han demostrado que es importante la cantidad de tiempo que una lechada de cemento fluye en flujo turbulento por un mismo punto del espacio anular. Si el canal de lodo es puesto en movimiento, aún cuando su velocidad es mucho menor que la del cemento fluyendo en el lado ancho del anillo, después de suficiente tiempo el canal de lodo puede moverse encima de la zona crítica.

Es ampliamente reconocido que todos estos factores afectan la eficiencia del proceso de remoción de lodo del espacio anular por la lechada de cemento. En una situación particular, puede no ser posible o aún necesario maximizar cada factor; hasta cierto grado se estima que un factor puede compensar a otro.

En cualquier caso, los factores más importantes para tener mejores resultados de trabajos de cementación primaria son

- Acondicionamiento del lodo de perforación
- Centralización de la tubería
- Movimiento de la tubería

#### **5.4.1. IMPORTANCIA DE HIDRAULICA DE CEMENTACION PRIMARIA DE TUBERIAS**

La comprensión de la mecánica de fluidos en el hueco del pozo es útil para seleccionar equipos de bombeo, determinar composiciones de lechadas de cemento y técnicas de colocación del cemento en el espacio anular entre el hueco y la tubería. Con los viscosímetros rotacionales de velocidades múltiples se ha comprendido mejor las propiedades reológicas de flujo de fluidos, permitiendo el desarrollo de análisis de comportamiento

reológico de fluidos.

El uso de parámetros reológicos de fluidos de cemento y perforación permite calcular los siguientes factores : <sup>16</sup>

- Velocidad anular y caudal de bombeo requeridos para establecer flujos tapón, laminar o turbulento
- Velocidad de la lechada de cemento en la tubería
- Pérdidas de presión por fricción en la tubería y en el espacio anular entre el hueco y tubería para lodo de perforación, espaciadores y mezcla de cemento
- Presiones esperadas en cabeza a medida que el tapón es desplazado en la tubería
- Potencia hidráulica requerida en superficie
- Volumen de lechada para un determinado tiempo de contacto
- Tiempo requerido para completar la operación de cementación

El agua es un fluido Newtoniano. Los fluidos como lodos de perforación, lechadas de cemento, espaciadores y fluidos de desplazamiento son clasificados como No-Newtonianos; algunos tipos de estos fluidos fluirán a través de las etapas de flujo tapón, laminar y turbulento.

Los modelos matemáticos más empleados para describir el comportamiento de flujo de lodos de perforación y lechadas de cemento son los modelos de fluido Plástico Bingham y Ley de Potencia.

#### **5.4.2. TEORIAS DE DESPLAZAMIENTO DEL FLUIDO DE PERFORACION**

El desplazamiento incompleto del lodo es una causa común de fracaso en cementación primaria. Durante la producción del pozo los canales ocupados por lodo pueden ser abiertos permitiendo la migración vertical de gas, petróleo o agua detrás de la tubería de revestimiento.

En trabajos de cementación primaria el método preferido es reducir las propiedades reológicas del lodo y cemento para inducir flujo turbulento a moderados caudales. El flujo

turbulento tiene componentes radiales de velocidad que ejercen fuerzas de resistencia y de empuje que promueven la mezcla de fluidos en las interfases, aumentando la probabilidad de remoción del lodo de restricciones del hueco. Las primeras interfases de cemento pueden ser altamente contaminadas con lodo, pero empleando mayores volúmenes de lechada puede colocarse cemento competente frente a la zona de interés.

Los fluidos Plástico Bingham en flujo turbulento o tapón y los fluidos Ley de Potencia en flujo turbulento tienen perfiles planos de distribución de velocidades a través del área transversal de flujo. Los fluidos espaciadores o lechadas de cemento en flujo laminar tienen perfiles parabólicos de distribución de velocidades, los cuales tienden a formar canales de lodo en el espacio anular entre el hueco y la tubería.

En flujo turbulento o tapón la lechada de cemento o espaciador ejercerá una presión más uniforme y efectuará mejor remoción del lodo. Ambos son los métodos adecuados para desplazar el fluido de perforación del espacio anular por cemento.

La literatura muestra la eficiencia del flujo turbulento en remover el lodo circulable del hueco; sin embargo, hay situaciones en que no es posible alcanzar altos caudales de desplazamiento. La geometría del hueco, tamaño de los espacios anulares, propiedades de flujo del lodo y cemento, y restricciones de presión pueden determinar el empleo de flujo tapón.

En consecuencia, y además de los factores mecánicos como centralización y reciproca-ción de la tubería para debilitar los paquetes estáticos de lodo, es importante seleccionar el mejor régimen de desplazamiento de flujo posible de la lechada de cemento.

#### **5.4.3. RAZONES PARA OBTENER UN BUEN TRABAJO DE CEMENTACION**

Las ventajas de obtener un buen trabajo de cementación primaria de tuberías de revestimiento son : <sup>16-17-18</sup>

- Exclusión de agua o gas indeseables del intervalo de completación
- Restricción de tratamientos de fracturamiento hidráulico o acidificación al intervalo deseado
- Eliminación de costos de cementación forzada

- Soporte y protección de la tubería
- Reducción de costos de completación por ejecución de la cementación primaria de manera tal que el pozo no requerirá trabajos de cementación forzada

#### **5.4.4. FACTORES QUE AFECTAN LOS RESULTADOS DE TRABAJOS DE CEMENTACION**

Estudios de laboratorio y trabajos de campo efectuados desde la década de 1940 hasta la presente demuestran que los resultados de trabajos de cementación primaria de tuberías son afectados por los siguientes factores : <sup>17-18</sup>

- Acondicionamiento del fluido de perforación
- Estado de la superficie exterior de la tubería
- Minimizar presiones de surgencia mientras se baja la tubería de revestimiento
- Centralización de la tubería
- Empleo de rascadores
- Uso de zapato y collar flotadores
- Movimientos de la tubería : rotación o reciprocación
- Empleo de tapones de cementación de fondo y tope
- Empleo de fluidos lavadores o lechadas de cemento tipo scavenger
- Caudal de desplazamiento
- Empleo de KCl (3-5%) en las lechadas de cemento
- Grandes cantidades de fluidos espaciadores
- Diferencia de densidades entre lodo y cemento
- Empleo de fluidos espaciadores
- Optimo uso de equipos de mezclado para control de densidad de las lechadas de cemento

La mayoría de esas prácticas son aceptadas firmemente hoy en día, pero no son siempre aplicadas. Siete de estos factores son básicos en el desplazamiento del fluido de perforación :

- Condiciones del lodo
- Movimiento de la tubería
- Centralización de la tubería
- Caudal de flujo
- Cantidad de fluidos desplazantes
- Fuerza de empuje
- Fluidos espaciadores

#### **5.4.4.1. CONDICIONES DEL FLUIDO DE PERFORACION**

Los primeros trabajos de investigación reconocieron que la disminución de la viscosidad del fluido de perforación aumenta la eficiencia de desplazamiento del lodo. Luego se comprobó que cuando se disminuye la resistencia de gel del lodo por disminución del punto de cedencia, se aumenta la probabilidad de éxito de remoción del lodo del espacio anular.

Modelos de estudios demuestran que la eficiencia de remoción del fluido de perforación del espacio anular del pozo es afectada por dos principales propiedades del lodo

- Propiedades thixotrópicas, relacionadas directamente con la resistencia de gel
- Características de deposición de la costra de filtrado del lodo

El factor de movilidad del fluido de perforación es una función inversa de las características de la costra de filtrado y la máxima resistencia de gel del lodo. Se ha demostrado que cuando este factor aumenta, por disminución del filtrado o de la resistencia de gel a 10 minutos, incrementa dramáticamente la eficiencia de desplazamiento del fluido de perforación.

Debido a que la resistencia de gel del lodo está directamente relacionada con el punto de cedencia, las propiedades de lodo deseables antes del trabajo de cementación son

- Punto de cedencia de 5 lbf/100 p<sup>2</sup> o menores
- Viscosidad plástica de 10 cp o menores

El tiempo de circulación del lodo debería ser el que corresponde a por lo menos dos veces el volumen del hueco que está siendo circulado. Estudios de laboratorio y campo han demostrado que el hueco del pozo deber ser circulado y cementado a velocidad anular mínima de 262 pies por minuto.

#### **5.4.4.2. MOVIMIENTO DE LA TUBERIA**

Trabajos de investigación demostraron que los movimientos de rotación y reciprocación de la tubería mejoran notablemente la remoción de lodo por ruptura de canales de lodo gelificados del espacio anular. Actualmente se reconoce que el movimiento de la tubería es el segundo factor principal para aumentar la eficiencia de desplazamiento del lodo y obtener mejores resultados de trabajos de cementación primaria.

Los estudios demostraron que cuando la tubería está severamente descentralizada, el movimiento de rotación es más beneficioso que el de reciprocación. Durante la rotación de la tubería, las fuerzas de arrastre cemento-tubería tienden a jalar al cemento dentro de los canales de lodo.

Si la tubería está adecuadamente centralizada el movimiento de reciprocación es mejor que el de rotación. La reciprocación causa movimiento lateral de la tubería a medida que los centralizadores se mueven por las irregularidades del hueco, alterando el área de flujo y fomentando la remoción de lodo.

En un modelo de hueco de pozo en donde no hubo movimiento de tubería, se obtuvo sólo 65 % de eficiencia de desplazamiento; mientras que el movimiento de rotación de la tubería bajo similares condiciones de trabajo produjo 99 % de eficiencia de remoción del lodo.

#### **5.4.4.3. CENTRALIZACION DE LA TUBERIA**

Los primeros estudios de cementación publicados en la década de 1940 reconocieron la importancia de la centralización de la tubería. Esta ayuda a crear un área anular uniforme de flujo igualando la distribución de presión y resistencia de flujo alrededor de la tubería,

favoreciendo la remoción del lodo del espacio anular.

Como los fluidos de perforación y cemento son fluidos No-Newtonianos, requieren cierta presión para establecer un caudal de flujo significativo. Si la tubería no está adecuadamente centralizada, el cemento tenderá a fluir y desplazar el lodo del lado con mayor área de flujo del espacio anular en donde la resistencia al flujo es menor, dejando canales de lodo en el lado angosto del espacio anular.

Se tienen diversos ejemplos de estudios sobre los efectos de centralización de la tubería en la eficiencia de remoción del lodo. Cuando la tubería estuvo altamente descentralizada (17 % centralización), sólo se logró 45 % de eficiencia de desplazamiento; sin embargo, con 72 % de centralización de la tubería, la eficiencia de remoción aumentó a 97 %.

#### **5.4.4.4. CAUDAL DE FLUJO**

La mayor parte de investigaciones y estudios de campo han concluido que los canales de lodo gelificado depositados en los lados angostos del espacio anular son reducidos en tamaño por incremento del caudal de flujo de la lechada de cemento, aumentando la eficiencia de desplazamiento del fluido de perforación circulable del hueco anular.

Los tipos de flujo tapón, laminar y turbulento de lechadas de cemento están asociados con la remoción del lodo de perforación del hueco. Para fluidos Newtonianos en flujo tapón el Número de Reynolds es menor que 100, para flujo laminar debe ser entre 1000 y 2100, mientras que para la fase de transición entre flujos laminar y turbulento debe ser entre 2100 y 3000. El flujo turbulento para fluidos Newtonianos se define como aquel que tiene Número de Reynolds mayor que 3000.

Las condiciones para flujo turbulento o altos caudales de flujo se logran mediante acondicionamiento del fluido de perforación y empleo de lechadas de cemento menos viscosas. Se comprobó que disminuyendo las propiedades reológicas del cemento se puede extender el flujo turbulento en un anillo excéntrico, pero esto puede reducir la eficiencia de desplazamiento por aumento de la tendencia del cemento a dejar lodo viscoso en la parte angosta del hueco anular.

El flujo turbulento produce máxima remoción de lodo del espacio anular y tiene mayor

velocidad anular. Sin embargo, en algunas condiciones el flujo turbulento no es posible y la lechada de cemento debe ser diseñada con las mejores propiedades reológicas posibles. Es importante bombear el fluido al mayor caudal posible pero no se debe comprometer un trabajo de cementación por tratar de alcanzar flujo turbulento.

Bajos caudales de flujo se han usado para minimizar la cantidad de contaminación en la interfase lodo-lechada de cemento. Sin embargo, el flujo tapón para cemento no es sugerido como reemplazo de altos caudales, sino sólo como una alternativa en casos en donde otras técnicas son impracticables.

#### **5.4.4.5. CANTIDAD DE FLUIDOS DE DESPLAZAMIENTO**

En la década de 1960 se efectuaron estudios de desplazamiento de lodo con lechadas de cemento en flujo turbulento. Se concluyó que cuando la lechada de cemento fluye en flujo turbulento por la región anular crítica durante 10 minutos o más, se aumenta la eficiencia de desplazamiento del fluido de perforación del espacio anular del hueco.

El tiempo de contacto se define como el período de tiempo que un punto particular en el área anular permanece en contacto con la lechada de cemento. Este concepto de tiempo de contacto para mezclas de cemento en flujo turbulento también puede ser aplicado para fluidos lavadores y espaciadores.

Cuando la lechada de cemento está en flujo laminar el tiempo de contacto no es importante, ya que el cemento no ejerce suficiente esfuerzo de arrastre para empezar a mover el canal de lodo del espacio anular.

#### **5.4.4.6. DIFERENCIA DE DENSIDADES**

Conclusiones de trabajos de investigación han mostrado que la diferencia de densidades entre lechada de cemento y lodo produce fuerzas de gravedad que promueven la ruptura de la estructura de gel del lodo y pueden mejorar la eficiencia de su desplazamiento del espacio anular entre el hueco y tubería.

Cuando el fluido desplazante es más pesado que el lodo, la fuerza de empuje es aditiva a

las fuerzas de flujo y la remoción de lodo del hueco es superior que cuando las densidades de ambos fluidos son iguales. Cuando el lodo es más pesado que el fluido desplazante, las fuerzas de gravedad son opuestas a las de flujo y el lodo puede desprenderse y caer en el fluido de menor densidad si el esfuerzo de corte del fluido desplazante es bastante bajo para impedir el soporte del lodo.

Actualmente la diferencia de densidades es de 1 a 3 lb/gal y no es un factor crítico de diseño. La lechada de cemento debe ser más pesada que el lodo, pero esta diferencia no necesita ser maximizada. Mejor remoción de lodo se ha obtenido con diferencia reducida de densidades entre cemento y lodo mediante colocación del cemento a altos caudales de desplazamiento.

#### **5.4.4.7. FLUIDOS ESPACIADORES**

En la década de 1980 los investigadores recomendaron un sistema de fluido espaciador compatible con lodo y cemento con capacidad de alcanzar turbulencia a moderados caudales, ser pesado, no precipitar los sólidos y dejar las superficies de tubería y formación en condición de mojable por agua.

Resultados de modelos de estudio indican que fluidos espaciadores de bajos peso y viscosidad aumentan la movilidad del lodo y erosionan la costra de filtrado, mejorando la eficiencia de remoción de lodo del hueco. El empleo de espaciadores en flujo turbulento permite usar sistemas de desplazamiento con tiempo de contacto mayor que 10 minutos sin afectar el esfuerzo de compresión de la lechada de cemento.

Los lodos base aceite dejan las superficies de tubería y formación en condición de mojables por petróleo y no son compatibles con otros fluidos de pozo. Para combatir esos efectos indeseables, se han desarrollado espaciadores que dejan la tubería y formación en condición de mojables por agua y nuevos sistemas de espaciadores de flujo turbulento que son igualmente efectivos en lodos de base agua y de base aceite.

## **5.5. APLICACIONES DE REOLOGIA A LECHADAS DE CEMENTO**

### **5.5.1. REGRESION LINEAL DE DATOS DE VELOCIDAD DE CORTE Y ESFUERZO DE CORTE DEL FLUIDO**

Los datos experimentales de velocidad de corte y esfuerzo de corte de la lechada de cemento obtenidos con el viscosímetro rotacional pueden ser sometidos a regresión lineal en coordenadas cartesianas y logarítmicas para determinar si la lechada de cemento tiene el comportamiento de fluido Plástico Bingham o Ley de Potencia y para calcular sus propiedades reológicas.<sup>2</sup>

Para estos cálculos se emplean las relaciones para velocidad de corte y esfuerzo de corte del fluido derivadas en la sección 2.5.4. y las fórmulas de parámetros **c**, **a** y **b** de regresión lineal indicadas en las secciones 2.6.1.-2.6.2. y 2.6.3..

Sea **P** el número de pares ordenados de datos de velocidad de corte y esfuerzo de corte obtenidos con el viscosímetro rotacional. Aplicando la técnica de regresión lineal a dichos **P** puntos se determina la línea recta de ajuste cuya ecuación es la siguiente : **y = ax+b**.

Para las ecuaciones reológicas de Plástico Bingham y Ley de Potencia se tiene

- **x** = velocidad de corte o su logaritmo (V ó log V)
- **y** = esfuerzo de corte o su logaritmo (t ó log t)

Se calculan los coeficientes de correlación por mínimos cuadrados. El coeficiente del modelo que más se aproxima a 1 indica mejor ajuste de la regresión lineal, determinando cuál es el modelo de flujo que corresponde a la lechada de cemento.

#### **5.5.1.1. MODELO DE FLUIDO PLASTICO BINGHAM**

Las relaciones de velocidad de corte y esfuerzo de corte del fluido con las variables de regresión lineal en coordenadas cartesianas son las siguientes :<sup>2-14</sup>

$$x = 1.7023N$$

$$y = 0.01065L$$

Donde :

- **N** es velocidad de rotación del viscosímetro rotacional en revoluciones por minuto (RPM)
- **x** es velocidad de corte en  $s^{-1}$
- **L** es lectura del viscosímetro rotacional en grados de deflexión del disco selector
- **y** es esfuerzo de corte del fluido en  $lbf/p^2$

Los resultados que se obtienen son los siguientes :

- **Parámetros a y b**

Son la pendiente e intercepción con el eje de ordenadas de la línea recta de regresión lineal en coordenadas cartesianas.

Con los factores de conversión de unidades correspondientes, las propiedades del fluido se calculan mediante relaciones de los parámetros **a** y **b**.

- **Viscosidad plástica** en centipoises (cp)

$$PV = 47880.26a$$

- **Punto de cedencia** en  $lbf/100 p^2$

$$YP = 100b$$

#### 5.5.1.2. MODELO DE FLUIDO LEY DE POTENCIA

Las relaciones de velocidad de corte y esfuerzo de corte del fluido con las variables de regresión lineal en coordenadas logarítmicas son las siguientes : <sup>2-14</sup>

$$x = \log(1.7023N)$$

$$y = \log(0.01065L)$$

Donde :

- **N** es velocidad de rotación del viscosímetro rotacional en revoluciones por minuto (RPM)
- **x** es logaritmo natural de la velocidad de corte en  $s^{-1}$
- **L** es lectura del viscosímetro rotacional en grados de deflexión del disco selector
- **y** es logaritmo natural de esfuerzo de corte del fluido en  $lbf/p^2$

Los resultados que se obtienen son los siguientes

- **Parámetros a y b**

Son la pendiente e intercepción con el eje de ordenadas de la línea recta de regresión lineal en coordenadas logarítmicas.

$$b = \log(k1), \text{ donde } \log \text{ es función logaritmo natural}$$

$$k1 = \exp(b), \text{ donde } \exp \text{ es función exponencial}$$

Con las fórmulas establecidas en el apéndice J de la Norma 10 del Instituto Americano de Petróleo (1986), se calculan las propiedades reológicas del fluido mediante relaciones de los parámetros **a** y **b**.

- **Índice comportamiento de flujo** en unidad adimensional

- **Índice de consistencia** en  $lbf \cdot s^n/p^2$

$$K = \frac{k1(3n+1)^n}{(4n)^n}$$

## **5.6. DESARROLLO DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA**

Este trabajo presenta el programa de computadora **CEME** para determinar propiedades reológicas y caudales críticos de lechadas de cemento para los modelos de fluido Ley de Potencia y Plástico Bingham. Se basa en el procedimiento del apéndice J de la Norma 10 del Instituto Americano de Petróleo.

El programa **CEME** está elaborado en lenguaje BASIC para microcomputadora y compilado para ser ejecutado desde el indicador del DOS en computadoras con sistema operativo DOS y con el comando Ejecutar en computadoras con sistema operativo Windows.

Los datos de velocidad de corte y esfuerzo de corte son sometidos a regresión lineal en coordenadas cartesianas y logarítmicas para determinar las propiedades reológicas de lechadas de cemento: índice de comportamiento de flujo, índice de consistencia, viscosidad plástica y punto de cedencia.

Para flujos tapón y turbulento de los modelos de fluido Ley de Potencia y Plástico Bingham se obtienen los siguientes resultados para la lechada de cemento en el espacio anular entre el hueco y la tubería de revestimiento :

- Número de Reynolds Crítico
- Caudal crítico
- Velocidad equivalente de corte

### **5.6.1. METODO DE CALCULO ESTABLECIDO POR EL INSTITUTO AMERICANO DE PETROLEO**

En el apéndice J de la Norma 10 del Instituto Americano de Petróleo (julio 1986) se establece un método normalizado para determinar propiedades reológicas, pérdidas de presión y caudales críticos para flujos tapón y turbulento de lechadas de cemento para los modelos de fluido Bingham y Ley de Potencia. <sup>14</sup>

Para el desarrollo de cálculos de reología de lechadas de cemento se realizan las siguientes suposiciones básicas

- El fluido exhibe esencialmente propiedades de flujo independientes del tiempo
- El flujo es de estado continuo
- Deslizamiento del fluido en la pared es cero
- El flujo es completamente desarrollado

Las relaciones matemáticas para calcular propiedades reológicas y caudales críticos para flujos tapón y turbulento de lechadas de cemento se indican en la sección siguiente.

Se destaca que este método se presenta como un esfuerzo para normalizar procedimientos para la industria petrolera, no está intentado para eliminar otros métodos pero sí para dar fundamentos comunes para propósitos de comparación.

En el apéndice H (Determinación de Propiedades Reológicas) se establece el uso preferente de viscosímetros rotacionales de 12 y 6 velocidades. Se indica que para las mediciones y análisis de propiedades reológicas de lechadas de cemento no debe usarse la velocidad de rotación de 600 RPM ( $1021.4 \text{ s}^{-1}$ ).

Dicha velocidad de corte para los diámetros más empleados de hueco y tubería corresponde a caudales de flujo mayores que 20 bpm, situación poco común porque las lechadas de cemento se diseñan para alcanzar turbulencia a menores caudales, límite de gradiente de fractura de formación y capacidad de caudal de desplazamiento de las bombas de superficie.

Este procedimiento se ha desarrollado para ser empleado esencialmente para lechadas de cemento no dispersas. Para lechadas dispersas generalmente los rendimientos de datos y resultados serían de menor calidad con este procedimiento de cálculo.

### 5.6.2. FORMULAS EMPLEADAS

La nomenclatura de variables y parámetros es la siguiente

- $D_h$  = diámetro del hueco del pozo (pg)
- $D$  = diámetro interno de la tubería (pg)

- $D_p$  = diámetro externo del revestimiento (pg)
- $D_e$  = diámetro hidráulico del espacio anular (pg)
- $w$  = densidad del cemento (lbm/gl)
- $n$  = índice comportamiento de flujo adimensional
- $K$  = índice de consistencia (lbf-s<sup>n</sup>/p<sup>2</sup>)
- $PV$  = viscosidad plástica (cp)
- $YP$  = punto de cedencia (lbf/100 p<sup>2</sup>)
- $Q$  = caudal de flujo (bpm)
- $V$  = velocidad promedio de flujo (pps)
- $NR$  = Número de Reynolds del fluido
- $NH$  = Número de Hedstrom del fluido
- $NRC$  = Número de Reynolds Crítico
- $Q_m$  = caudal crítico flujo turbulento o tapón espacio anular (bpm)
- $R$  = velocidad equivalente de corte para flujo espacio anular (rpm)

Las fórmulas empleadas para calcular propiedades reológicas y caudales críticos de lechadas de cemento para modelos Bingham y Ley de Potencia se indican en las secciones siguientes.

#### 5.6.2.1. MODELO DE FLUIDO PLASTICO BINGHAM

Las fórmulas empleadas en el programa son las siguientes : <sup>14</sup>

- Los parámetros **viscosidad plástica (PV)** en cp y **punto de cedencia (YP)** en lbf/100 p<sup>2</sup> de la lechada de cemento se obtienen con las relaciones indicadas en la sección 5.5.1.1.
- **Velocidad promedio de flujo en el espacio anular**

$$V = \frac{17.16Q}{(D_h^2 - D_p^2)}$$

- **Número de Reynolds y Número de Hedstrom para flujo en el espacio anular, donde  $D_e = D_h - D_p$**

$$NR = 927.6 \frac{w V D_e}{PV}$$

$$NH = \frac{3.7 \cdot 10^4 w YP D_e^2}{PV^2}$$

- **El Número de Reynolds Crítico (NRC) para flujo turbulento** se obtiene del gráfico Factor de fricción de Fanning-Números de Reynolds y Hedstrom para flujo Plástico Bingham.

El Número de Reynolds Crítico es la intercepción de la línea del Número de Hedstrom calculado para el fluido con la curva para flujo turbulento de fluidos Newtonianos.

El programa realiza la interpolación del Número de Reynolds Crítico en función de las líneas bases de Números de Hedstrom, de segmentos rectos obtenidos de la curva para flujo turbulento de fluidos Newtonianos y con el Número de Hedstrom calculado para el fluido.

- **Caudal mínimo para flujo turbulento en el espacio anular**

$$Q_m = \frac{6.283PV NRC(D_h + D_p)}{10^5 w}$$

- **Caudal máximo para flujo tapón en el espacio anular**

Se asume que el flujo tapón ocurre para Número de Reynolds igual a 100. En la fórmula anterior de caudal mínimo para flujo turbulento se reemplaza  $NRC = 100$

- **Velocidad equivalente de corte para flujo en el espacio anular**

$$R = \frac{1451.48Q_m}{(D_h - D_p)(D_h^2 - D_p^2)}$$

Donde  $Q_m$  es el mínimo caudal para flujo turbulento ó el máximo caudal para flujo tapón.

### 5.6.2.2. MODELO DE FLUIDO LEY DE POTENCIA

Las fórmulas empleadas en el programa son las siguientes : <sup>14</sup>

- Los parámetros **índice de comportamiento de flujo (n)** en unidad adimensional e **índice de consistencia (K)** en  $\text{lbf}\cdot\text{s}^n/\text{p}^2$  de la lechada de cemento se obtienen con las relaciones indicadas en la sección 5.5.1.2.

- **Velocidad promedio de flujo en el espacio anular**

$$V = \frac{17.16Q}{(D_h^2 - D_p^2)}$$

- **Número de Reynolds Generalizado para flujo en el espacio anular,** donde  $D_e = D_h - D_p$

$$NR = \frac{1.86w V^{(2-n)}}{K(96/D_e)^n}$$

- **El Número de Reynolds Generalizado Crítico (NRC) para flujo turbulento** depende del valor de  $n$ .

<u>Rango</u> <u>valores de n</u>	<u>Número</u> <u>Reynolds Crítico</u>
0.95 <= n <= 1.00	3000
0.85 <= n < 0.95	3100
0.75 <= n < 0.85	3200
0.65 <= n < 0.75	3300
0.55 <= n < 0.65	3400

0.45 <= n < 0.55	3500
0.35 <= n < 0.45	3600
0.25 <= n < 0.35	3700
0.00 <= n < 0.25	3800

- **Caudal mínimo para flujo turbulento en el espacio anular**

El Número de Reynolds Generalizado Crítico (NRC) se obtiene de la tabla anterior.

$$Q_m = 0.05828(D_h^2 - D_p^2) \left[ \frac{(K \text{ NRC} (96/D_e)^n)^{1/(2-n)}}{(1.86w)^{1/(2-n)}} \right]$$

- **Caudal máximo para flujo tapón en el espacio anular**

Se asume que el flujo tapón ocurre para Número de Reynolds Generalizado igual a 100. En la fórmula anterior de caudal mínimo para flujo turbulento se reemplaza NRC = 100

- **Velocidad equivalente de corte para flujo en el espacio anular**

$$R = \frac{1451.48Q_m}{(D_h - D_p)(D_h^2 - D_p^2)}$$

Donde  $Q_m$  es el mínimo caudal para flujo turbulento ó el máximo caudal para flujo tapón.

### 5.6.3. DATOS REQUERIDOS

Cuando se ejecuta el programa se presenta la siguiente lista de alternativas de selección

- ( 1 ) Composición de la lechada de cemento
- ( 2 ) Datos dos (2) lecturas esfuerzo corte
- ( 3 ) Datos seis (6) lecturas esfuerzo corte

- ( 4 ) Datos siete (7) lecturas esfuerzo corte
- ( 5 ) Datos nueve (9) lecturas esfuerzo corte
- ( 6 ) Datos once (11) lecturas esfuerzo corte
- ( 7 ) Calcular reología y caudal crítico
- ( 8 ) Imprimir resultados
- ( 9 ) Terminar programa

Para la alternativa (1) de composición de la lechada de cemento es necesario aceptar los datos propuestos o ingresar nuevos datos

- Nombre del pozo
- Tipo de cemento
- Primer aditivo de cemento
- Segundo aditivo de cemento
- Tercer aditivo de cemento
- Cuarto aditivo de cemento
- Quinto aditivo de cemento
- Sexto aditivo de cemento

Para las alternativas (2)-(6) de geometría de pozo y lecturas de esfuerzo de corte del viscosímetro rotacional es necesario aceptar los datos propuestos o ingresar nuevos datos según el dato de número seleccionado de lecturas de esfuerzo de corte:

- Temperatura circulante de fondo (°F)
- Diámetro de broca (pg)
- Diámetro externo de tubería (pg)
- Densidad de lechada de cemento (lbm/gl)
- Lectura a 300 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 200 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 180 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 100 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 90 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 60 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 30 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 6 rpm (grado deflex.)

- Lectura a 3 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 1.8 rpm (grado deflex.)
- Lectura a 0.9 rpm (grado deflex.)

#### 5.6.4. DESCRIPCION DE LOS ALGORITMOS DE CALCULO

El programa de cómputo **CEME** tiene las siguientes opciones de número de lecturas de esfuerzo de corte para calcular propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento :

- Dos (2) lecturas de esfuerzo de corte
- Seis (6) lecturas de esfuerzo de corte
- Siete (7) lecturas de esfuerzo de corte
- Nueve (9) lecturas de esfuerzo de corte
- Once (11) lecturas de esfuerzo de corte

La descripción del procedimiento de cálculo empleado en dicho programa es

- El programa recupera los datos de composición de la mezcla de cemento del archivo **COMCEM.DAT**, información que se emplea para identificar la composición de cemento que corresponde a los resultados de propiedades reológicas y caudal crítico. Se presentan las opciones de ingresar nuevos datos o de no modificar los datos propuestos.
- El programa recupera los datos de geometría de pozo y lecturas de esfuerzo de corte de los archivos **REOCEM6.DAT** ó **REOCEM11 .DAT** para una de las cinco alternativas de número de lecturas de esfuerzo de corte. Se presentan la opciones de ingresar nuevos datos o de no modificar datos.

Los datos de esfuerzo de corte se obtienen de la prueba de reología de lechada de cemento efectuada con el viscosímetro cilíndrico rotacional.

- Los datos de velocidad de corte y esfuerzo de corte de la lechada de cemento son sometidos a regresión lineal en coordenadas cartesianas para

el modelo de fluido Plástico Bingham y en coordenadas logarítmicas para el modelo de fluido Ley de Potencia.

Con estas regresiones se determinan los coeficientes de correlación de los modelos y las propiedades reológicas de viscosidad plástica, punto de cedencia, índice de comportamiento de flujo e índice de consistencia del fluido mediante las relaciones matemáticas indicadas en la secciones **5.5.1.** y **5.5.2.**.

- Para fluido Plástico Bingham el programa calcula el Número de Hedstrom mediante las relaciones matemáticas indicadas en la sección **5.6.2.1.**. Luego por interpolación determina el Número de Reynolds Crítico en función de las líneas bases de Números de Hedstrom, de segmentos rectos de la curva de Número de Reynolds para flujo turbulento de fluidos Newtonianos y con el Número de Hedstrom calculado para la lechada de cemento.
- Para fluido Ley de Potencia el programa determina el Número de Reynolds Crítico para flujo turbulento en función del parámetro índice de comportamiento de flujo según la tabla de relación que se indica en la sección **5.6.2.2.**.
- Para ambos modelos de fluido el flujo tapón se produce para Número de Reynolds =100
- Para cada modelo de fluido y cada diámetro de hueco, el programa emplea los valores de propiedades reológicas y Números de Reynolds Crítico y las fórmulas indicadas en las secciones **5.6.2.1.** y **5.6.2.2.** para determinar los caudales crítico y velocidades equivalentes de corte en el espacio anular para flujos tapón y turbulento.

#### **5.6.5. RESULTADOS OBTENIDOS**

Se obtienen los siguientes resultados de propiedades reológicas de la lechada de cemento :

- Modelo de fluido Ley de Potencia
  - Coeficiente de correlación
  - Índice de comportamiento de flujo
  - Índice de consistencia
  
- Modelo de fluido Plástico Bingham
  - Coeficiente correlación
  - Viscosidad plástica
  - Punto de cedencia

Para los modelos de fluido Ley de Potencia y Plástico Bingham se obtienen los siguientes resultados para la lechada de cemento en el espacio anular entre el hueco y la tubería

- Caudal crítico de flujo tapón (bpm)
- Velocidad equivalente de corte caudal crítico flujo tapón (rpm)
- Número de Reynolds Crítico para flujo turbulento
- Caudal crítico de flujo turbulento (bpm)
- Velocidad equivalente de corte caudal crítico flujo turbulento (rpm)

### **5.7. RESULTADOS DE EJEMPLO DE APLICACION DEL PROGRAMA**

Se describen los datos necesarios y resultados de la aplicación efectuada para la cementación primaria de la lina de 7" en el pozo 160D-Corrientes :

- Pozo : 160D-Corrientes
- Fecha : mayo de 1996
- Profundidad de zapato de forros de 9-5/8" : 2478 m
- Broca diamante policristalino compacto : 8.5" M-70
- Profundidad de perforación : 3134 m
- Diámetro externo de la tubería : 7"
- Profundidad de zapato tipo V : 3130 m
- Profundidad de landing collar : 3102 m

- Profundidad de tope de lina : 2378 m
- Composición de la lechada: cemento Andino V + 35% sílica flour+1.5 % Halad-14+0.2 % DAIR-1+5 % KCl
- Densidad de mezcla : 16.4 lb/gl
- Nueve velocidades de rotación del viscosímetro rotacional 300; 200; 180; 100; 90; 60; 30; 6 y 3 rpm
- Lecturas de esfuerzo de corte a las respectivas velocidades de corte: 91; 65; 59; 35; 30; 23; 15; 2 y 1

Mediante regresión lineal de nueve pares de datos de velocidad y esfuerzo de corte, el programa calcula 0.99579 y 0.99706 para los coeficientes de correlación de fluidos Ley de Potencia y Plástico Bingham, respectivamente. Se concluye que la lechada de cemento tiene el comportamiento Plástico Bingham.

Se obtienen los siguientes resultados de propiedades reológicas y caudal crítico

- Viscosidad plástica = 90.6 cp
- Punto de cedencia = 3.3 lbf/100 p<sup>2</sup>
- Caudal crítico de flujo turbulento entre hueco de 8-1/2" y tubería de revestimiento de 7" = 11.3 bpm
- Velocidad equivalente de corte = 470 rpm

Con la tubería de 7" se emplearon 31 centralizadores :

- 19 tipo S4 de 9" en hueco abierto
- 2 tipo S4 de 10.5" en hueco abierto
- 3 tipo fluidmaster de 10.5" en hueco abierto
- 4 tipo turbolizador de 8-1/4" en hueco abierto
- 3 tipo slim-hole entre tuberías de 9-5/8" y 7"

El lodo fue acondicionado y circulado durante 2.5 horas a 4.5 bpm y 3 horas a 6 bpm, las propiedades de lodo en la línea de retorno del pozo al final del acondicionamiento fueron :

- Densidad 10.0 lb/gl
- Punto cedente 8.0 lbf/100 p<sup>2</sup>

- Viscosidad plástica

10.0 cp

Para el trabajo de cementación primaria se consideró desplazar el cemento a 6 bpm debido a que el fluido de perforación fue circulado a 6 bpm para tener la máxima velocidad anular posible sin llegar a turbulencia, además el máximo caudal de desplazamiento del equipo de cementación es 10 bpm.

Se mezclaron y bombearon los siguientes fluidos :

- 10 bl agua dulce con 3 % de KCl
- 30 bl super flush
- 10 bl agua dulce con 3 % de KCl
- 138 bl lechada de cemento (540 bg), 16.4 lb/gl

La lechada de cemento fue desplazada con 217 bl de lodo a 6.5 bpm y 5 bpm, llegando los tapones al collar con 3000 psi de presión en superficie. Se efectuó la circulación directa para retornar los fluidos lavadores y exceso de cemento.

Con el registro CBL-VDL se determinó excelente adherencia entre cemento y tubería y entre cemento y formación en toda la longitud del intervalo cementado, con lecturas de registro entre 0.5 mV y 2 mV para la adherencia entre cemento y tubería.

El resultado del trabajo de cementación primaria de la lina de 7" en el pozo 160D-Corrientes es excelente, de acuerdo a los criterios de clasificación de resultados establecidos en el artículo "Como Obtener Buenos Trabajos de Cementación Primaria" de Smink-Kundert <sup>19</sup>.

La impresión de los datos y resultados obtenidos con el programa se presenta en el anexo adjunto. También se incluye copia del registro CBL-VDL del pozo 160D-Corrientes.

## 6. CONCLUSIONES

### 6.1. PROGRAMA PARA DISEÑAR HIDRAULICA DE PERFORACION PARA FLUIDO BINGHAM

Las conclusiones sobre este programa son las siguientes

- El programa diseña la hidráulica de perforación en la broca para los métodos de máxima potencia hidráulica y máxima fuerza de impacto con  $u=1.86$  de la ecuación  $P_c=kQ^u$  de pérdidas de presión en el sistema de circulación.

Los resultados obtenidos con este programa son muy similares a los que se consiguen con los programas de hidráulica de las compañías de fluidos de perforación y fabricantes de brocas, demostrando la validez de las relaciones matemáticas consideradas para calcular las pérdidas de presión por fricción y de los algoritmos empleados en el programa de computadora

- Además, el programa optimiza la hidráulica de perforación para un valor del exponente  $u$  previamente determinado para un pozo en perforación, que con frecuencia es distinto de  $u=1.89$  asumido por Kendall-Goins.

Dicho exponente expresa la relación entre caudal y pérdidas de presión en el sistema de circulación de tuberías y espacios anulares, es calculado mediante regresión lineal por el programa **BOQUI** o por técnicas gráficas de caudales y presiones reducidas de circulación.

Esta posibilidad de cálculo permite revisar cuantas veces se considere necesario los pronósticos de hidráulica para un pozo en perforación, superando a los programas de hidráulica de las compañías de fluidos de perforación y fabricantes de brocas que no consideran esta alternativa.

- La optimización de la energía hidráulica gastada en la broca permite aplicar mejores niveles de parámetros de peso sobre la broca y velocidad de

rotación. Estos tres factores, además del tipo de broca y de fluido de perforación, son parámetros críticos para aumentar la velocidad de penetración y reducir los costos de perforación.

El empleo de este programa permitiría aumentar los niveles de energía hidráulica específica en la broca, contribuyendo a que se pueda emplear mejores parámetros de peso sobre la broca y velocidad de rotación.

## **6.2. PROGRAMA PARA CALCULAR DIAMETROS OPTIMOS DE BOQUILLAS DE BROCA**

Las conclusiones sobre este programa son las siguientes

- El programa determina los diámetros óptimos de boquillas para optimizar la hidráulica para la siguiente carrera de broca de un pozo en perforación. Este cálculo se realiza mediante los parámetros **k-u** de la ecuación  **$P_c = kQ^u$**  de pérdidas de presión, determinados a partir de regresión lineal de caudales y presiones reducidas de circulación obtenidos con la broca empleada en perforar el pozo.
- Además, el valor del exponente **u** puede ser usado por el programa **HI-DRA** (anterior) para revisar el pronóstico de hidráulica para un pozo en perforación o para un pozo próximo a ser perforado.
- Los trabajos de investigación demuestran que es posible lograr aumentos significativos en la velocidad de penetración mediante el cálculo apropiado de boquillas.

El empleo de este programa permitiría aumentar los niveles de energía hidráulica específica en la broca, contribuyendo a que se pueda aplicar mejores parámetros de peso sobre la broca y velocidad de rotación.

### **6.3. PROGRAMA PARA CALCULAR PROPIEDADES REOLOGICAS Y CAUDAL CRITICO DE LECHADAS DE CEMENTO**

Las conclusiones sobre este programa son las siguientes :

- El programa determina propiedades reológicas y caudal crítico de flujo turbulento de lechadas de cemento para cementación primaria de tuberías.

Permite comprobar propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento para evitar emplear aquellas muy dispersas que pueden canalizarse a través del fluido de perforación y formar paquetes de lodo gelificado en el espacio anular entre hueco y tubería que no son removidos por la lechada de cemento.

Este criterio y el desplazamiento del cemento en flujo turbulento o a la mayor velocidad anular posible, además de los principales factores de acondicionamiento del lodo, centralización y reciprocación de la tubería, permiten incrementar la eficiencia de remoción del lodo del espacio anular y, por consiguiente, obtener mejores resultados de trabajos de cementación primaria de tuberías.

- Para que los resultados de propiedades reológicas y caudal crítico del programa tengan validez práctica, es necesario que las densidades de mezcla en los trabajos de cementación sean muy similares a los de las lechadas ensayadas en el laboratorio. Se ha comprobado que algunas mezclas de cemento presentan variación significativa de sus propiedades reológicas al cambio en la densidad en valores mayores que 0.2 lb/gl.
- El tipo de equipo de mezclado de la unidad de cementación es crítico para obtener densidades de mezcla iguales o casi iguales a los de las lechadas ensayadas en el laboratorio.

El sistema jet-mixer se utilizó desde el inicio de las operaciones de perforación de pozos en 1971 y dejó de emplearse en 1992. Los sistemas RCM y batch mixer se emplearon desde 1992 y 1995, respectivamente.

Con el sistema jet-mixer se tenían severas limitaciones para alcanzar densidades uniformes de mezcla ocasionando resultados deficientes e inconsistencias en la evaluación de resultados de trabajos. Con los equipos RCM todavía se tienen limitaciones para obtener densidades uniformes de la lechada de cemento.

Con el sistema batch mixer se obtienen densidades de mezcla casi totalmente uniformes, mejorando la probabilidad de optimizar los factores de caudal de desplazamiento y de diferencia de densidades entre lodo y cemento que afectan el proceso de remoción del lodo por la lechada de cemento del espacio anular entre el hueco del pozo y la tubería.

## **7. RECOMENDACIONES**

### **7.1. PROGRAMA PARA DISEÑAR HIDRAULICA DE PERFORACION PARA FLUIDO BINGHAM**

Las recomendaciones que se originan de este programa son las siguientes :

- Aplicar este programa en las operaciones de perforación de pozos en Selva y comparar sus resultados de diseño con los que se obtienen con los programas de las compañías de brocas y fluidos de perforación, a fin de comprobar sus grados de aproximación al comportamiento real de la hidráulica en la perforación de pozos.
- Desarrollar un programa de computadora para optimización de la hidráulica de perforación para modelo de fluido Ley de Potencia. El procedimiento es similar al del programa para fluido Plástico Bingham; es decir, calcular las pérdidas de presión por fricción y determinar los valores óptimos de caudal y tamaños de boquillas de broca.

Las relaciones matemáticas para determinar las pérdidas de presión por fricción para fluido Ley de Potencia están indicadas en el artículo "Simulador de Pérdidas de Presión Mejora la Selección de Boquillas" publicado en la revista Petroleum Engineer en julio de 1990.

### **7.2. PROGRAMA PARA CALCULAR DIAMETROS OPTIMOS DE BOQUILLAS DE BROCA**

Las recomendaciones que se originan de este programa son las siguientes :

- Emplear este programa en las operaciones de perforación de pozos en Selva para calcular los valores reales del exponente  $u$  de pérdidas de presión por fricción y determinar los tamaños óptimos de las boquillas de broca para pozos en perforación.

El cálculo de valores reales del exponente  $u$  permitiría establecer relaciones estadísticas entre las propiedades reológicas del lodo y el exponente  $u$  para el tipo de fluido de perforación que se emplea. Los valores calculados de  $u$  pueden ser usados con el programa **HIDRA** para revisar los diseños de hidráulica de perforación.

### **7.3. PROGRAMA PARA CALCULAR PROPIEDADES REOLOGICAS Y CAUDAL CRITICO DE LECHADAS DE CEMENTO**

Las recomendaciones que se originan de este programa son las siguientes

- Aplicar este programa para determinar propiedades reológicas y caudal crítico de lechadas de cemento para cementación primaria de tuberías, principalmente para descartar aquellas muy dispersas que pueden canalizarse a través del fluido de perforación y formar paquetes de lodo gelificado en el espacio anular entre hueco y tubería con resultados desastrosos para la completación del pozo.
- Desarrollar programas para simular un trabajo de cementación primaria considerando el efecto de caída libre de la lechada de cemento en el pozo, con resultados similares a los que se obtienen con los programas de cementación de las compañías de servicios.
- La elaboración de estos programas permitiría acelerar el desarrollo de conocimientos teóricos avanzados de mecánica de fluidos de perforación y lechadas de cemento y de aplicaciones prácticas de programas de computadora.

## **8. LISTADOS DE LOS PROGRAMAS**

### **8.1. LISTADO DEL PROGRAMA PARA DISEÑAR HIDRAULICA DE PERFORACION PARA FLUIDO BINGHAM**

10 'PROGRAMA OPTIMIZACION HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
20 COLOR 7,0,0:CLS:KEY OFF:OPTION BASE 1  
25  
30 'VARIABLES DE CADENA Y ARCHIVOS DE DATOS  
40 DIM B1\$(11),B\$(13),T\$(24),A\$(19),Z\$(19),C\$(10),X\$(10)  
50 DIM B1(13),T(24),A(18),U(18)  
60 DIM X(15,3),B(15,3),PH(15)  
70 DIM W(15),PV(15),YP(15),R(15)  
80 DIM L(4),OD(4),ID(4)  
90 DIM F(3),F1(3),FO(3),Y1(4)  
100 DIM Z(7),LA(5),D1(5),D2(5)  
110 DIM R1(15),R2(15),R3(15),R4(15),R5(15)  
120 DIM R6(15),R7(15),R8(15),R9(15),PX(2)  
130 DIM PFA(3,15),ECD(3,15),A2(3,15),FI(3,15)  
140 DIM HP(3,15),E(3,15),V2(3,15),KK(3)  
150 DIM V(4),NH(4),PFT(4),VA(5),PF(5)  
160 DIM PC(3,15),Q(3,15),PB(3,15),NR(3,15,4)  
170 DIM NRC(3,15,4),PS(3,15)  
180 DIM NRA(3,15,5),NRCA(3,15,5),NHA(15)  
190 DIM Y(3,15,3),P(3,15),V1(3,15)  
195  
200 B\$(1)="DATOS TUBERIAS-GEOMETRIA DE POZO"  
210 B\$(2)="PROPIEDADES FLUIDO DE PERFORACION"  
220 B\$(3)="PRESION SUPERFICIE"  
230 B\$(4)="CAUDAL DE FLUJO":B\$(5)="CAUDAL-PRESION"  
240 B\$(6)="BOQUILLAS-CAUDAL":B\$(7)="BOQUILLAS-PRESION"  
250 B\$(8)="ENERGIA HSI BROCA"  
260 B\$(9)="PRESION-ENERGIA HSI":B\$(10)="CAUDAL-ENERGIA HSI"  
270 B\$(11)="BOQUILLAS-ENERGIA HSI"

```

280 B$(12)="IMPRIMIR RESULTADOS":B$(13)="TERMINAR PROGRAMA"
290 FOR I=3 TO 11:B$(I)=B$(I)+" "+"CONSTANTE": B1$(I)=B$(I): NEXT I
295
300 T$(1)="HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM"
310 T$(3)="PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996"
320 T$(4)="ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA"
330 T$(5)=B$(1):T$(7)="PROPIEDADES FLUIDO PERFORACION"
340 T1$=" PROF          PESO          PV          YP (LB/"
350 T2$=" (P)          (LPG)          (CP)          100 P^2)"
360 H$="#####          ##.##          ##.#          ##.#"
370 T$(8)=T1$:T$(9)=T2$:T3$=STRING$(LEN(T2$),"%")
380 T4$=" PROF    PESO    PV    YP (LB/"
390 T5$=" (P)    (LPG)    (CP)    100 P^2)"
400 H1$="#####    ##.##    ##.#    ##.#"
410 T6$=STRING$(LEN(T5$),"%")
420 T$(11)="HIDRAULICA OPTIMA          (PB/PS)"
430 T$(13)="POTENCIA HIDRAULI":T$(14)="FUERZA IMPACTO 1"
440 T$(15)="FUERZA IMPACTO 2"
445
450 T$(16)="%%%%% CAUD POPT POPT POPT DIAM PRES FZA HP ENG
PES NR NRC"
460 T$(17)=" PRF OPTM CIRC BROC SUPF BOQUI BROC IPT BRO ESP
EQV H-DC H-DC"
470 T$(18)=" (P) (GPM (PSI (PSI (PSI (1/32) (PSI (LB (HP HSI (LPG
%%%%%%%%%"
480 G$="##### ##.## ##### ##### ## ## ## ##### ##### ##### ##.## ##.#
##### #####"
490 T$(20)="PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
500 T$(21)="1....INGRESAR NUEVOS DATOS ( ).....CONTINUAR"
510 T$(22)="1....GRABAR REGISTRO ( ).....CONTINUAR"
520 T$(23)="SELECCIONAR UNA OPCION .....[ ]":T$(24)=" "
530 T=1:GOSUB 540:T=5:GOSUB 540:T=9:GOSUB 540:T=11:GOSUB 540:
T=18:GOSUB 540: GOTO 560
540 IF T=1 THEN I$="#" ELSE I$="%"
550 T$(T+1)=STRING$(LEN(T$(T)),I$):RETURN

```

```

555
560 FOR I=1 TO 13:IF I<10 THEN J=0 ELSE J=1
570   B$(I)=STR$(I)+STRING$(40-J-LEN(B$(I)),".")+B$(I)
580   B1(I)=(80-LEN(B$(I)))/2
590 NEXT I
600 FOR I=1 TO 24:T(I)=(80-LEN(T$(I)))/2:NEXT I
605
610 A$(1)="NOMBRE POZO":A$(2)="NUM. SECC. TUBERIA PESADA"
620 J=0:FOR I=3 TO 9 STEP 3:J=J+1:J$=STR$(J)+SPACE$(5)
630   A$(I)="LONGITUD "+J$+" (P)"
640   A$(I+1)="DIAM. EXT. "+J$+" (PG)"
650   A$(I+2)="DIAM. INT. "+J$+" (PG)"
660 NEXT I
670 A1$="TUBERIA ":A2$="DIAM. EXT. (PG)":A3$="DIAM. INT. (PG)"
680 A4$="FORROS ":A5$="PROF. HUECO "
690 A$(12)=A1$+A2$:A$(13)=A1$+A3$
700 A$(14)=A4$+"PROF. ZAP. (P)":A$(15)=A4$+A2$
710 A$(16)="BROCA "+A2$:A$(17)=A5$+"INIC. (P)"
720 A$(18)=A5$+"FINAL (P)"
730 A$(19)="PENDIENTE LOG(PC)-LOG(Q)"
735
740 C$(1)="PRESION SUPERFICIE (PSI)"
750 C$(2)="CAUDAL DE FLUJO (GPM)"
760 FOR I=1 TO 3:I$=STR$(I)+SPACE$(4)
770   C$(I+2)="DIAM. BOQUILLA "+I$+"(1/32 PG)"
780 NEXT I
790 C$(6)=C$(1):C$(7)="ENERGIA ESPECIFICA (HP/PG^2)"
800 C$(8)=C$(2)
810 E1=0:WW=0:GOTO 870
815
820 COLOR 15,1:LOCATE J,T(T):PRINT T$(T)::COLOR 7,0
830 IF T=20 THEN X$=INKEY$:IF X$="" THEN 830 ELSE 860
840 IF J=24 OR J=25 THEN X$=INPUT$(1):ZZ=VAL(X$):GOTO 850 ELSE 860
850 LOCATE J,T(T):PRINT SPC(LEN(T$(T)))
860 RETURN

```

```

865
870 J=2:T=1:GOSUB 820
880 FOR I=1 TO 13:LOCATE 3+I,B1(I):PRINT B$(I):NEXT I
890 J=20:T=23:GOSUB 820:T=T(23)+LEN(T$(23))-4
900 LOCATE 20,T:INPUT "",X$:E=VAL(X$)
910 IF E<=0 OR E>13 THEN 950
920 IF E>=3 THEN 930 ELSE 940
930 IF E1<=1 THEN 950 ELSE 960
940 IF E=1 THEN 960 ELSE IF E1=0 THEN 950 ELSE 960
950 BEEP:LOCATE 20,T:PRINT SPC(3):GOTO 900
960 IF E<=11 THEN YY=E:CLS
970     ON E GOTO 980,1410,1900,1980,2050,2130,2210,2290,2360,2430,2510,4240,
4710
980 'SUBROUTINA PARA DIMENSIONES DE TUBERIAS-GEOMETRIA DE POZO
985
990 OPEN "R",#1,"GEOMETRI.DAT",82
1000 FIELD #1,10 AS Z1$,4 AS Z$(1),4 AS Z$(2),4 AS Z$(3),4 AS Z$(4),4 AS Z$(5),4
AS Z$(6),4 AS Z$(7),4 AS Z$(8),4 AS Z$(9),4 AS Z$(10),4 AS Z$(11),4 AS Z$(12),4 AS
Z$(13),4 AS Z$(14),4 AS Z$(15),4 AS Z$(16),4 AS Z$(17),4 AS Z$(18)
1010 GET #1,1:A1$=Z1$
1020 FOR I=1 TO 18:U(I)=CVS(Z$(I)):NEXT I
1025
1030 J=2:T=5:GOSUB 820
1040 FOR I=1 TO 19:LOCATE 2+I,10:PRINT A$(I):NEXT I:COLOR 15,1
1050 FOR I=1 TO 19:J=2+I
1060     LOCATE J,40:PRINT SPC(10):LOCATE J,55:PRINT SPC(20)
1070 NEXT I
1080 LOCATE 3,40:PRINT A1$
1090 FOR I=1 TO 18:LOCATE 3+I,40:PRINT USING "#####.##";U(I):NEXT I
1095
1100 J=24:T=21:GOSUB 820
1110 IF ZZ=1 THEN 1120 ELSE 1280
1120 COLOR 15,1:FOR I=1 TO 19:LOCATE 2+I,60:PRINT SPC(10):NEXT I
1130 FOR I=1 TO 18:A(I)=0:NEXT I:COLOR 15,4
1140 LOCATE 3,55:INPUT "",NP$:IF NP$<>"" THEN A1$=NP$

```

```

1145 '
1150 FOR I=1 TO 18:J=3+I
1160   LOCATE J,55:INPUT "",A$:IF A$<>"" THEN 1170 ELSE 1190
1170   IF VAL(A$)<=0 THEN 1180 ELSE 1190
1180   BEEP:LOCATE J,55:PRINT SPC(10):GOTO 1160
1190   A(I)=VAL(A$):IF A(I)=0 THEN LOCATE J,65:PRINT USING "#####.##";U(I)
1200   IF A(I)>0 THEN LOCATE J,65:PRINT USING "#####.##";A(I)
1210 NEXT I
1220 FOR I=1 TO 18:IF A(I)>0 THEN U(I)=A(I) ELSE 1230
1230 NEXT I
1235
1240 J=24:T=22:GOSUB 820
1250 IF ZZ=1 THEN 1260 ELSE 1280
1260 LSET Z1$=A1$:FOR I=1 TO 18:LSET Z$(I)=MK$$(U(I)):NEXT I
1270 PUT #1,1
1280 CLOSE #1
1285
1290 N0=U(1):J=1
1300 FOR I=2 TO 3*N0-1 STEP 3
1310   J=J+1:L(J)=U(I):OD(J)=U(I+1):ID(J)=U(I+2)
1320 NEXT I
1325 '
1330 OD(1)=U(11):ID(1)=U(12):PZ=U(13):DC=U(14)
1340 DB=U(15):PI=U(16):PF=U(17):MM=U(18):N=N0+1
1350 AB=0.7854*DB^2
1360 L0=0:FOR I=2 TO N:L0=L0+L(I):NEXT I
1370 F(1)=MM/(MM+1):F(2)=MM/(MM+2):F(3)=(MM+1)/(MM+2)
1380 F1(1)=MM:F1(2)=MM/2:F1(3)=MM+1
1390 XX=INT(.5+(PF-PI)/1000):XY=INT((PF-PI)/XX):N1=XX+1
1400 E1=E:CLS:GOTO 870
1405
1410 'SUBROUTINA PARA PROPIEDADES DE LODO
1420 OPEN "R",#2,"LODO.DAT",12
1430 FIELD #2,4 AS X$(1),4 AS X$(2),4 AS X$(3)
1440 FOR I=1 TO 15

```

```

1450   GET #2,I:FOR J=1 TO 3:X(I,J)=CVS(X$(J)):NEXT J
1460 NEXT I
1465 '
1470 J=2:T=7:GOSUB 820
1480 FOR I=1 TO 3:LOCATE 4+I,T(8):PRINT T$(7+I):NEXT I
1490 CX=PI:FOR I=1 TO N1:PH(I)=CX:CX=CX+XY:NEXT I:COLOR 15,1
1500 FOR I=1 TO N1
1510   LOCATE 7+I,T(8):PRINT USING "#####";PH(I)
1520 NEXT I
1530 FOR I=1 TO N1:K=T(8)
1540   FOR J=1 TO 3
1550     K=K+15:LOCATE 7+I,K:PRINT USING "##.##";X(I,J)
1560   NEXT J
1570 NEXT I
1575 '
1580 J=24:T=21:GOSUB 820
1590 IF ZZ=1 THEN 1600 ELSE 1850
1600 COLOR 15,1:K=T(8)+8
1610 FOR J=1 TO 3:K=K+15
1620   FOR I=1 TO N1
1630     LOCATE 7+I,K:PRINT SPC(5)
1640   NEXT I
1650 NEXT J
1655
1660 FOR I=1 TO N1:FOR J=1 TO 3:B(I,J)=0:NEXT J:NEXT I:COLOR 15,4
1670 FOR I=1 TO N1:K=T(8)+8
1680   FOR J=1 TO 3:K=K+15:J1=7+I
1690     LOCATE J1,K:INPUT "",A$:IF A$<>"" THEN 1700 ELSE 1720
1700     IF VAL(A$)<=0 THEN 1710 ELSE 1720
1710     BEEP:LOCATE J1,K:PRINT SPC(5):GOTO 1690
1720     B(I,J)=VAL(A$)
1730     IF B(I,J)=0 THEN LOCATE J1,K:PRINT USING "##.##";X(I,J)
1740   NEXT J
1750 NEXT I
1760 FOR I=1 TO N1:FOR J=1 TO 3

```

```

1770   IF B(I,J)>0 THEN X(I,J)=B(I,J)
1780 NEXT J:NEXT I
1785 '
1790 J=24:T=22:GOSUB 820
1800 IF ZZ=1 THEN 1810 ELSE 1850
1810 FOR I=1 TO N1
1820   FOR J=1 TO 3:LSET X$(J)=MKS$(X(I,J)):NEXT J
1830   PUT #2,I
1840 NEXT I
1850 CLOSE #2:J=1
1860 FOR V=1 TO N1
1870   W(V)=X(V,J):PV(V)=X(V,J+1):YP(V)=X(V,J+2)
1880 NEXT V
1890 E1=E:CLS:GOTO 870
1895 '
1900 'E=3:SUBROUTINA PRESION SUPERFICIE CONSTANTE
1910 NX=1:NY=0:GOSUB 2590
1920 PM=Y1(1)
1930 FO(1)=PM/(MM+1):FO(2)=2*PM/(MM+2):FO(3)=PM/(MM+2)
1940 Q=200:FOR M=1 TO 3:GOSUB 2700:NEXT M
1950 GOSUB 4170
1960 J=24:T=20:GOSUB 820
1970 E1=E:CLS:GOTO 870
1975
1980 'E=4:SUBROUTINA CAUDAL FLUJO LODO CONSTANTE
1990 NX=1:NY=1:GOSUB 2590
2000 Q=Y1(1)
2010 FOR M=1 TO 3:GOSUB 2700:NEXT M
2020 GOSUB 4170
2030 J=24:T=20:GOSUB 820
2040 E1=E:CLS:GOTO 870
2045
2050 'E=5:SUBROUTINA CAUDAL-PRESION CONSTANTES
2060 NX=2:NY=0:GOSUB 2590
2070 PM=Y1(1):Q=Y1(2)

```

```

2080 M=1:GOSUB 2700
2090 GOSUB 4050
2100 M=1:GOSUB 4100
2110 J=24:T=20:GOSUB 820
2120 E1=E:CLS:GOTO 870
2125 '
2130 'E=6:SUBROUTINA CAUDAL-DIAMETROS BOQUILLAS CONSTANTES
2140 C$(6)=C$(2):NX=4:NY=2:GOSUB 2590
2150 Q=Y1(4):A=7.6699E-04*(Y1(1)^2+Y1(2)^2+Y1(3)^2)
2160 M=1:GOSUB 2700
2170 GOSUB 4050
2180 M=1:GOSUB 4100
2190 J=24:T=20:GOSUB 820
2200 E1=E:CLS:GOTO 870
2205 '
2210 'E=7:SUBROUTINA DIAMETROS BOQUILLAS-PRESION CONSTANTES
2220 C$(6)=C$(1):NX=4:NY=2:GOSUB 2590
2230 PM=Y1(4):A=7.6699E-04*(Y1(1)^2+Y1(2)^2+Y1(3)^2)
2240 M=1:Q=200:GOSUB 2700
2250 GOSUB 4050
2260 M=1:GOSUB 4100
2270 J=24:T=20:GOSUB 820
2280 E1=E:CLS:GOTO 870
2285 '
2290 'E=8:SUBROUTINA ENERGIA HIDRAULICA ESPECIFICA BROCA CONSTANTE
2300 NX=1:NY=6:GOSUB 2590
2310 EB=Y1(1):Q=1000
2320 FOR M=1 TO 3:GOSUB 2700:NEXT M
2330 GOSUB 4170
2340 J=24:T=20:GOSUB 820
2350 E1=E:CLS:GOTO 870
2355 '
2360 'E=9:SUBROUTINA PRESION-ENERGIA HIDRAULICA ESPECIFICA BROCA
CONSTANTES
2370 NX=2:NY=5:GOSUB 2590

```

```

2380 PM=Y1(1):EB=Y1(2)
2390 M=1:Q=200:GOSUB 2700
2400 GOSUB 4050:M=1:GOSUB 4100
2410 J=24:T=20:GOSUB 820
2420 E1=E:CLS:GOTO 870
2425 '
2430 'E=10:SUBROUTINA CAUDAL-ENERGIA HIDRAULICA ESPECIFICA BROCA
CONSTANTES
2440 NX=2:NY=6:GOSUB 2590
2450 EB=Y1(1):Q=Y1(2)
2460 M=1:GOSUB 2700
2470 GOSUB 4050
2480 M=1:GOSUB 4100
2490 J=24:T=20:GOSUB 820
2500 E1=E:CLS:GOTO 870
2505 '
2510 'E=11:SUBROUTINA BOQUILLAS-ENERGIA HIDRAULICA ESPECIFICA BROCA
CONSTANTES
2520 C$(6)=C$(7):NX=4:NY=2:GOSUB 2590
2530 EB=Y1(4):A=7.6699E-04*(Y1(1)^2+Y1(2)^2+Y1(3)^2)
2540 M=1:GOSUB 2700
2550 GOSUB 4050
2560 M=1:GOSUB 4100:C$(6)=C$(1)
2570 J=24:T=20:GOSUB 820
2580 E1=E:CLS:GOTO 870
2585 '
2590 'SUBROUTINA INGRESO DE DATOS DIVERSAS OPCIONES HIDRAULICA
2600 J=5:T(24)=B1(E):T$(24)=B$(E):T=24:GOSUB 820
2610 FOR I=1 TO NX:LOCATE 7+I,10:PRINT C$(I+NY):NEXT I:COLOR 15,1
2620 FOR I=1 TO NX:LOCATE 7+I,50:PRINT SPC(20):NEXT I:COLOR 15,4
2630 FOR I=1 TO NX:J=7+I
2640 LOCATE J,50:INPUT "",X$
2650 IF VAL(X$)<=0 THEN 2660 ELSE 2670
2660 BEEP:LOCATE J,50:PRINT SPC(10):GOTO 2640
2670 Y1(I)=VAL(X$):LOCATE J,60:PRINT USING "####.##";Y1(I)

```

```

2680 NEXT I:COLOR 7,0
2690 RETURN
2695 '
2700 'SUBROUTINA GEOMETRIA SECCIONES DE POZO-PRESION POR FRICCION
2710 LOCATE 1,1:COLOR 15,4:PRINT "ESPERE : CALCULANDO"
2720 KK=0
2730 FOR V=1 TO N1
2740   L(1)=PH(V)-L0:L=0:J=0:U=1:XX=1
2750   FOR I=N TO 1 STEP -1
2760     J=J+1:Z(U)=PH(V)-L
2770     L=L+L(I)
2780     IF ABS(Z(U)-PZ)>L(I) THEN 2790 ELSE 2820
2790     IF Z(U)-PZ>0 THEN 2800 ELSE 2810
2800     LA(J)=L(I):D1(J)=DB:D2(J)=OD(I):GOTO 2850
2810     LA(J)=L(I):D1(J)=DC:D2(J)=OD(I):GOTO 2850
2820     IF XX=1 THEN 2830 ELSE J=J-1:I=I+1:GOTO 2850
2830     LA(J)=Z(U)-PZ:D1(J)=DB:D2(J)=OD(I)
2840     J=J+1:LA(J)=L(I)-LA(J-1):D1(J)=DC:D2(J)=OD(I):XX=XX+1:GOTO 2850
2850     U=U+1
2860   NEXT I
2865 '
2870   CC=1
2880   R(V)=37100!*W(V)*YP(V)/PV(V)^2:R1(V)=928*W(V)/PV(V)
2890   R2(V)=PV(V)/1500:R3(V)=YP(V)/225:R4(V)=W(V)/25.8
2900   R5(V)=24700*W(V)*YP(V)/PV(V)^2:R6(V)=757*W(V)/PV(V)
2910   R7(V)=PV(V)/1000:R8(V)=YP(V)/200:R9(V)=W(V)/21.1
2915 '
2920   IF E=11 THEN GOSUB 4000
2930   GOSUB 3190
2940   ON E-2 GOSUB 3680,3750,3780,3810,3840,3880,3930,3970,4030
2950   ON E-2 GOTO 2960,2980,2980,2980,2960,2960,2960,2980,2980
2955 '
2960   IF P1<=10 THEN 2980 ELSE 2970
2970   IF Q>2000 THEN Q=200:GOTO 3160 ELSE IF Q>100 THEN 2930 ELSE 3160
2975 '

```

```

2980 PFA(M,V)=PFA:PC(M,V)=PC:Q(M,V)=Q
2990 IF PB<=0 THEN 3160 ELSE PB(M,V)=PB
3000 PS(M,V)=PC(M,V)+PB(M,V):ECD(M,V)=PFA(M,V)/(.052*PH(V))+W(V)
3010 A1=SQR(W(V)*Q(M,V)^2/(10858*PB(M,V)))
3020 D=20.847*A1^.5
3030 N2=INT((D-INT(D))*3+.5)
3040 FOR L=3 TO 1 STEP -1
3050     Y(M,V,L)=INT(D)+INT((N2+1)/3+.5)
3060     N2=N2-1
3070 NEXT L
3080 A2(M,V)=7.6699E-04*(Y(M,V,1)^2+Y(M,V,2)^2+Y(M,V,3)^2)
3090 P(M,V)=W(V)*Q(M,V)^2/(10858*A2(M,V)^2)
3100 V1(M,V)=.32086*Q(M,V)/A2(M,V)
3110 FI(M,V)=W(V)*Q(M,V)*V1(M,V)/1932
3120 HP(M,V)=P(M,V)*Q(M,V)/1714:E(M,V)=HP(M,V)/AB
3130 V2(M,V)=Q(M,V)/(2.448*((DB)^2-(OD(1))^2))*60:KK=KK+1
3140 COLOR 15,4:LOCATE 3,1:PRINT "Q OPTM=";Q
3150 CC=1:IF E=3 OR E=7 OR E=9 THEN Q=200
3160 NEXT V:KK(M)=KK:KK=0
3165 '
3170 CC=1:IF E=3 OR E=7 OR E=9 THEN Q=200
3180 RETURN
3185 '
3190 'SUBROUTINA PARA DETERMINAR PERDIDAS PRESION POR FRICCION
3200 COLOR 15,1:LOCATE 1,70:PRINT TIME$
3210 COLOR 14,1:LOCATE 2,1:PRINT "Q=";Q
3220 PFT=0
3230 FOR I=1 TO N
3240     V(I)=Q/(2.448*ID(I)^2)
3250     NH(I)=R(V)*ID(I)^2
3260     NR(M,V,I)=R1(V)*V(I)*ID(I)
3270     X=.7
3280     K=16800/NH(I)
3290     Y=X-(X^3-3*X^2+(K+3)*X-1)/(3*X^2-6*X+(K+3))
3300     IF ABS(Y-X)<=.00001 THEN 3320

```

```

3310 X=Y:GOTO 3290
3320 NRC(M,V,I)=(NH(I)/(8*Y))*(1-4/3*Y+1/3*Y^4)
3330 IF NR(M,V,I)>=NRC(M,V,I) THEN 3360
3340 PFT(I)=(R2(V)*V(I)/ID(I)^2+R3(V)/ID(I))*L(I)
3350 GOTO 3420
3360 X=.01
3370 K=4*LOG(NR(M,V,I))/LOG(10)-.395
3380 Y=X-(2*LOG(X)/LOG(10)-X^(-.5)+K)/(2/(LOG(10)*X)+.5*X^(-1.5))
3390 IF ABS(Y-X)<=.00001 THEN 3410
3400 X=ABS(Y):GOTO 3380
3410 PFT(I)=(R4(V)*Y*V(I)^2/ID(I))*L(I)
3420 PFT=PFT+PFT(I)
3430 NEXT I
3435 '
3440 PFA=0
3450 FOR J=1 TO N+1
3460 VA(J)=Q/(2.448*(D1(J)^2-D2(J)^2))
3470 NHA(J)=R5(V)*(D1(J)-D2(J))^2
3480 NRA(M,V,J)=R6(V)*VA(J)*(D1(J)-D2(J))
3490 X=.7
3500 K=22400!/NHA(J)
3510 Y=X-(X^3-3*X^2+(K+3)*X-1)/(3*X^2-6*X+(K+3))
3520 IF ABS(Y-X)<=.00001 THEN 3540
3530 X=Y:GOTO 3510
3540 NRCA(M,V,J)=NHA(J)*((2/3)^(1/2)/(8*Y))*(1-3/2*Y+.5*Y^3)
3550 IF NRA(M,V,J)>=NRCA(M,V,J) THEN 3580
3560 PF(J)=(R7(V)*VA(J)/(D1(J)-D2(J))^2+R8(V)/(D1(J)-D2(J)))*LA(J)
3570 GOTO 3640
3580 X=.01
3590 K=4*LOG(NRA(M,V,J))/LOG(10)-.395
3600 Y=X-(2*LOG(X)/LOG(10)-X^(-.5)+K)/(2/(LOG(10)*X)+.5*X^(-1.5))
3610 IF ABS(Y-X)<=.00001 THEN 3630
3620 X=ABS(Y):GOTO 3600
3630 PF(J)=(Y*W(V)*VA(J)^2/(21.1*(D1(J)-D2(J))))*LA(J)
3640 PFA=PFA+PF(J)

```

```

3650 NEXT J
3660 PC=PFT+PFA:PC=PC+100
3670 RETURN
3675 '
3680 'E=3:PRESION SUPERFICIE CONSTANTE
3690 PCO=FO(M)
3700 P1=ABS(PC-PCO)
3710 IF P1>10 AND CC=1 THEN PX(1)=PC:Q1=Q:Q=Q+500:CC=CC+1:GOTO 3740
3720 IF P1<=10 THEN PB=PM-PC:GOTO 3740 ELSE 3730
3730 PX(2)=PC:Q2=Q:Q=(Q2*(PCO-PX(1))+Q1*(PX(2)-PCO))/(PX(2)-PX(1)):Q1=Q2:
PX(1)=PX(2)
3740 RETURN
3745 '
3750 'E=4:CAUDAL FLUJO LODO CONSTANTE
3760 PB=F1(M)*PC
3770 RETURN
3775 '
3780 'E=5:CAUDAL-PRESION SUPERFICIE CONSTANTE
3790 PB=PM-PC
3800 RETURN
3805 '
3810 'E=6:BOQUILLAS-CAUDAL CONSTANTE
3820 PB=W(V)*Q^2/(10858*A^2)
3830 RETURN
3835 '
3840 'E=7:BOQUILLAS-PRESION CONSTANTE
3850 PB=W(V)*Q^2/(10858*A^2):PS=PC+PB
3860 P1=ABS(PM-PS):P2=.5*(PM-PS):PB=PB+P2:Q=SQR(10858*A^2*PB/W(V))
3870 RETURN
3875 '
3880 'E=8:ENERGIA HIDRAULICA HSI BROCA CONSTANTE
3890 PBO=F1(M)*PC:PB=1714*AB*EB/Q
3900 P1=ABS(PB-PBO):PB1=.5*(PB+PBO)
3910 Q=1714*AB*EB/PB1
3920 RETURN

```

```

3925 '
3930 'E=9:PRESION-ENERGIA HSI CONSTANTES
3940 PB=PM-PC:PBO=1714*AB*EB/Q
3950 P1=ABS(PBO-PB):Q=1714*AB*EB/PB
3960 RETURN
3965 '
3970 'E=10:CAUDAL-ENERGIA HSI CONSTANTES
3980 PB=1714*AB*EB/Q
3990 RETURN
3995 '
4000 'E=11:BOQUILLAS-ENERGIA HSI CONSTANTE
4010 Q=(1714*10858*A^2*AB*EB/W(V))^(1/3):RETURN
4030 PB=W(V)*Q^2/(10858*A^2)
4040 RETURN
4045 '
4050 'SUBROUTINA PARA IMPRIMIR RESULTADOS HIDRAULICA EN PANTALLA
4060 COLOR 7,0:CLS:COLOR 15,1
4070 FOR I=1 TO 4:LOCATE I,T(19):PRINT T$(15+I):NEXT I
4080 BB=4:COLOR 7,0
4090 RETURN
4095 '
4100 FOR V=1 TO KK(M)
4110     BB=BB+1
4120     IF BB>21 THEN 4130 ELSE 4140
4130     J=23:T=20:GOSUB 820:GOSUB 4050:BB=BB+1
4140     LOCATE BB,T(19):PRINT USING G$;PH(V),Q(M,V),PC(M,V),PB(M,V),PS(M,V),
Y(M,V,1),Y(M,V,2),Y(M,V,3),P(M,V),FI(M,V),HP(M,V),E(M,V),ECD(M,V),NRA(M,V,1),NRC
A(M,V,1)
4150 NEXT V
4160 RETURN
4165 '
4170 'SUBROUTINA IMPRIMIR RESULTADOS TRES METODOS HIDRAULICA PANTA-
LLA
4180 GOSUB 4050
4190 FOR M=1 TO 3

```

```

4200   BB=BB+1:COLOR 15,4:LOCATE BB,T(12+M):PRINT T$(12+M):COLOR 7,0
4210   GOSUB 4100
4220  NEXT M
4230  RETURN
4235  '
4240  'SUBROUTINA PARA IMPRESION DE RESULTADOS
4245  IF WW=0 THEN 4250 ELSE 4430
4250  T$(8)=T4$:T$(9)=T5$:T$(10)=T6$
4270  LPRINT :LPRINT :GOSUB 4630
4280  T=5:GOSUB 4680
4290  LPRINT A$(1);TAB(29);A1$
4300  FOR I=1 TO 18
4310    LPRINT A$(I+1);TAB(31);USING "#####.##";U(I)
4315    IF I=10 THEN LPRINT
4320  NEXT I
4330  T=8:GOSUB 4680
4340  LPRINT T$(10)
4350  FOR I=1 TO N1
4360    LPRINT USING H1$;PH(I),W(I),PV(I),YP(I)
4370  NEXT I
4380  T=11:GOSUB 4680
4390  FOR I=1 TO 3
4400    LPRINT T$(12+I);TAB(33);USING "#.####";F(I)
4410  NEXT I
4415  '
4420  LPRINT CHR$(12)
4430  LPRINT : GOSUB 4630:LPRINT:LPRINT
4440  LPRINT B1$(YY)
4450  T=16:GOSUB 4680:T=18:GOSUB 4690
4460  IF YY=3 OR YY=4 OR YY=8 THEN 4470 ELSE 4480
4470  GOSUB 4490:GOTO 4590
4480  GOSUB 4550:GOTO 4590
4490  FOR M=1 TO 3
4500    JJ=(LEN(T$(19))-LEN(T$(12+M)))/2
4510    LPRINT TAB(JJ);T$(12+M)

```

```

4520   GOSUB 4550
4530   NEXT M
4540   RETURN
4545   '
4550   FOR V=1 TO KK(M)
4560   LPRINT USING G$;PH(V),Q(M,V),PC(M,V),PB(M,V),PS(M,V),Y(M,V,1),Y(M,V,2),
Y(M,V,3),P(M,V),FI(M,V),HP(M,V),E(M,V),ECD(M,V),NRA(M,V,1),NRCA(M,V,1)
4570   NEXT V
4580   RETURN
4590   '
4600   LPRINT CHR$(12)
4610   T$(8)=T1$:T$(9)=T2$:T$(10)=T3$
4620   E1=E:WW=WW+1:GOTO 890
4625   '
4630   LPRINT :LPRINT :LPRINT T$(2)
4640   T=1:GOSUB 4690:LPRINT :LPRINT
4650   FOR I=3 TO 4:LPRINT T$(I):NEXT I
4660   LPRINT DATE$;SPC(5);TIME$
4670   RETURN
4675   '
4680   LPRINT :LPRINT
4690   LPRINT T$(T)
4695   LPRINT T$(T+1)
4700   RETURN
4710   END

```

## **8.2. LISTADO DEL PROGRAMA PARA DETERMINAR DIAMETROS OPTIMOS DE BOQUILLAS DE BROCA**

```
10 'PROGRAMA DIAMETROS OPTIMOS DE BOQUILLAS DE BROCA
20 COLOR 7,0,0:CLS:KEY OFF:WIDTH 80:OPTION BASE 1
30 '
40 'VARIABLES DE CADENA Y ARCHIVO DE DATOS
50 DIM X1(6,4),X2(6,4),X3(6,4)
60 DIM T$(30),B$(10),A$(21),Z$(20)
70 DIM T(30),A(20),X(20),Q2(6,4)
80 DIM B(10),P(4),Q(4),PS(4),Q3(4),W(2),P0(4),PC(4)
90 DIM R(3),F(4),P1(6),Y(3)
100 DIM PB(6,4),P2(6,4),V(6,4),FI(6,4),HP(6,4),E(6,4)
110 B$(1)="DATOS BOQUILLAS,PRESION,CAUDAL"
120 B$(2)="CALCULAR HIDRAULICA OPTIMA BROCA"
130 B$(3)="IMPRIMIR RESULTADOS":B$(4)="TERMINAR PROGRAMA"
135 '
140 T$(1)="DIAMETROS OPTIMOS BOQUILLAS BROCA"
150 T$(3)="PROGRAMA JUNIO 91 REV. AGOSTO 1995"
160 T$(4)="ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA"
170 T$(5)="PESO LODO,DIAM.BOQUILLAS,PRESION,CAUDAL"
180 T$(7)="PRES SUP. CAUDAL BROCA PARAS"
190 T$(8)=" (PSI) (GPM) (PSI) (PSI)"
200 G$=" ####.# ####.# ####.# ####.#"
210 T$(10)="REGRESION LOG-LOG":T$(12)="COEF. CORRELACION"
220 T$(13)="PENDIENTE RECTA":T$(14)="INTERCEP. EJE LOG (PC)"
230 T$(15)="HIDRAULICA OPTIMA (PB/PS)"
240 T$(17)="HIDRAULICA ACTUAL"
250 T$(18)="POTENCIA HIDRAULI":T$(19)="FUERZA IMPACTO 1"
260 T$(20)="FUERZA IMPACTO 2":T$(21)="CAUDAL MINIMO"
270 T$(22)="CAUDAL VARIABLE"
275 '
280 T$(23)="%%%%%%%%%%%%%% PRES
VEL FZA %%%%%%%%%%"
290 T$(24)=" PS QOPT PESO PBOP BOQUI BROC BOQ IPT %% BROCA
```

```

%%"
300 T$(25)="(PSI (GPM) (LPG (PSI (1/32 PG) (PSI (PPS (LB (HP) (HSI)"
310 F$="####.###.# ##.# #### ## ## ## #### #### #### ####.# ##.##"
320 T$(27)="PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
330 T$(28)="1.....INGRESAR NUEVOS DATOS ( ).....CONTINUAR"
340 T$(29)="1.....GRABAR REGISTRO ( ).....CONTINUAR"
350 T$(30)="SELECCIONAR UNA OPCION.....( )"
360 T=1:GOSUB 370:T=5:GOSUB 370:T=8:GOSUB 370:T=10:GOSUB 370:T=15:
GOSUB 370:T=25:GOSUB 370:GOTO 390
370 IF T=1 THEN I$="#" ELSE I$="%"
380 T$(T+1)=STRING$(LEN(T$(T)),I$):RETURN
385 '
390 W1$="PESO LODO (LPG)":W2$="DIAM. EXT. (PG)"
400 W3$="BOQUI. DIAM. (1/32 PG)"
410 W4$="PRESION":W5$=" SUP.":W6$=" MAX. ": W7$=" (PSI)"
420 W8$="CAUDAL":W9$=" LODO":W10$=" VAR. ":W11$=" (GPM)"
425 '
430 A$(1)="NOMBRE POZO"
440 A$(2)="ACT. "+W1$:A$(3)="PROX. "+W1$
450 A$(4)="TUBERIA "+W2$:A$(5)="BROCA " +"DIAM. (PG)"
460 FOR I=1 TO 4
470 A$(8+I)=W4$+W5$+STR$(I)+W7$:A$(12+I)= W8$+W9$+STR$(I)+W11$
480 NEXT I
490 FOR I=1 TO 3:A$(5+I)=W3$:NEXT I
500 A$(17)="NUM. PUNTOS REGRES (2-4)"
510 FOR I=1 TO 2:A$(17+I)=W4$+W6$+W7$
520 A$(19+I)=W8$+W10$+W11$:NEXT I
525 '
530 FOR I=1 TO 4
540 B$(I)=STR$(I)+STRING$(40-LEN(B$(I)),".")+B$(I)
550 B(I)=(80-LEN(B$(I)))/2
560 NEXT I
570 FOR I=1 TO 30:T(I)=(80-LEN(T$(I)))/2:NEXT I
580 E1=0:GOTO 640
585

```

```

590 COLOR 15,1:LOCATE J,T(T):PRINT T$(T);:COLOR 7,0
600 IF T=27 THEN X$=INKEY$:IF X$="" THEN 600 ELSE 630
610 IF J=23 OR J=24 THEN X$=INPUT$(1):ZZ=VAL(X$):GOTO 620 ELSE 630
620 IF T<>30 THEN LOCATE J,T(T):PRINT SPC(LEN(T$(T)))
630 RETURN
635 '
640 J=2:T=1:GOSUB 590
650 FOR I=1 TO 4:LOCATE 4+I,B(I):PRINT B$(I):NEXT I
660 J=15:T=30:GOSUB 590
670 X$=INPUT$(1):E=VAL(X$)
680 IF E<=0 OR E>4 THEN BEEP:GOTO 670 ELSE 690
690 IF E>=2 THEN 700 ELSE 710
700 IF E1=0 THEN BEEP:GOTO 670 ELSE 710
710 ON E GOTO 720,1040,2000,2460
720 CLS:J=1:T=5:GOSUB 590
725 '
730 OPEN "R",#1,"BOQUILLA.DAT",90
740 FIELD #1,10 AS Z$,4 AS Z$(1),4 AS Z$(2),4 AS Z$(3),4 AS Z$(4),4 AS Z$(5),4 AS
Z$(6),4 AS Z$(7),4 AS Z$(8),4 AS Z$(9),4 AS Z$(10),4 AS Z$(11),4 AS Z$(12),4 AS
Z$(13),4 AS Z$(14),4 AS Z$(15),4 AS Z$(16),4 AS Z$(17),4 AS Z$(18),4 AS Z$(19),4 AS
Z$(20)
750 GET #1,1:A1$=Z$
760 FOR I=1 TO 20:A(I)=CVS(Z$(I)):NEXT I
765 '
770 FOR I=1 TO 21:LOCATE 1+I,10:PRINT A$(I):NEXT I:COLOR 15,1
780 FOR I=1 TO 21:K=1+I
790   LOCATE K,40:PRINT SPC(10):LOCATE K,55:PRINT SPC(20)
800 NEXT I
810 LOCATE 2,40:PRINT A1$
820 FOR I=1 TO 20:LOCATE 2+I,40:PRINT USING "####.##";A(I):NEXT I
825 '
830 J=24:T=28:GOSUB 590
840 IF ZZ=1 THEN 850 ELSE 1020
850 FOR I=1 TO 20:X(I)=0:NEXT I:COLOR 15,4
860 LOCATE 2,55:INPUT "",NP$:IF NP$<>"" THEN A1$=NP$

```

```

870 FOR I=1 TO 20:J=2+I
880 LOCATE J,55:INPUT "",X$:IF X$<>"" THEN 890 ELSE 910
890 IF VAL(X$)<=0 THEN 900 ELSE 910
900 BEEP:LOCATE J,55:PRINT SPC(10):GOTO 880
910 IF I=16 THEN 920 ELSE 930
920 IF VAL(X$)<2 OR VAL(X$)>4 THEN 900 ELSE 930
930 X(I)=VAL(X$):IF X(I)=0 THEN LOCATE J,65:PRINT USING "####.##";A(I)
940 IF X(I)>0 THEN LOCATE J,65:PRINT USING "####.##";X(I)
950 NEXT I
960 FOR I=1 TO 20:IF X(I)>0 THEN A(I)=X(I) ELSE 970
970 NEXT I
975 '
980 J=24:T=29:GOSUB 590
990 IF ZZ=1 THEN 1000 ELSE 1020
1000 LSET Z$=A1$:FOR I=1 TO 20:LSET Z$(I)=MK$(A(I)):NEXT I
1010 PUT #1,1
1020 CLOSE #1
1030 E1=E:CLS:GOTO 640
1035 '
1040 CLS:N=A(16)
1050 FOR I=1 TO N:P(I)=A(7+I):Q(I)=A(11+I):NEXT I
1060 N1=2:FOR I=1 TO N1:PS(I)=A(16+I):Q3(I)=A(18+I):NEXT I
1070 W(1)=A(1):W(2)=A(2):D1=A(3):D2=A(4)
1080 X1=A(5):X2=A(6):X3=A(7):P1=PS(1)
1090 C1=3.1416/4:C2=C1/(32^2)
1100 A=C1*D2^2
1110 A0=C2*(X1^2+X2^2+X3^2)
1120 C3=W(1)/(10858*A0^2)
1130 FOR I=1 TO N
1140 P0(I)=C3*(Q(I))^2
1150 PC(I)=P(I)-P0(I)
1160 NEXT I
1165 '
1170 S1=0:S2=0:S3=0:S4=0:S5=0
1180 FOR I=1 TO N

```

```

1190 S1=S1+LOG(Q(I))
1200 S2=S2+LOG(PC(I))
1210 S3=S3+LOG(Q(I))*LOG(PC(I))
1220 S4=S4+(LOG(Q(I)))^2
1230 S5=S5+(LOG(PC(I)))^2
1240 NEXT I
1245 '
1250 X=(S1*S2-N*S3)/(S1^2-N*S4)
1260 B=(S1*S3-S2*S4)/(S1^2-N*S4)
1270 K=EXP(B)
1280 C=(N*S3-S1*S2)/(((N*S4-S1^2)*(N*S5-S2^2))^.5)
1290 R(1)=C:R(2)=X:R(3)=K
1300 F(1)=P0(1)/P(1):F(2)=X/(X+1):F(3)=X/(X+2): F(4)=(X+1)/(X+2)
1305 '
1310 CLS:J=2:T=7:GOSUB 590:J=3:T=8:GOSUB 590
1320 FOR I=1 TO N:LOCATE 3+I,T(8)
1330 PRINT USING G$:P(I),Q(I),P0(I),PC(I):NEXT I
1340 J=9:T=10:GOSUB 590
1350 FOR I=1 TO 3
1360 LOCATE 10+I,T(8):PRINT T$(11+I)
1370 LOCATE 10+I,52:PRINT USING "#.#####";R(I)
1380 NEXT I
1390 J=15:T=15:GOSUB 590
1400 FOR I=1 TO 4
1410 LOCATE 16+I,T(8):PRINT T$(16+I)
1420 LOCATE 16+I,52:PRINT USING "#.#####";F(I)
1430 NEXT I
1440 J=23:T=27:GOSUB 590:CLS
1445
1450 C4=480*(D2^2-D1^2)/D2
1460 C5=K/W(1):C6=1/10858:C7=C6^.5
1470 C8=1/(3*C2)^.5:J=1:I=1
1480 FOR U=1 TO 6
1490 IF U=1 THEN 1500 ELSE 1510
1500 PB=P0(1):Q=Q(1):PS(1)=P(1):GOSUB 1800:GOTO 1630

```

```

1510 PS(1)=A(17)
1520 FOR I=1 TO N1
1530     IF U>=5 THEN 1560 ELSE 1540
1540     P1(I)=(1-F(U))*PS(I)
1550     C9=(P1(I)*W(1)/K)^(1/X)
1560     FOR J=1 TO 2
1570         IF U=5 THEN Q=C4/W(J):GOTO 1600
1580         IF U=6 THEN Q=Q3(I):GOTO 1600
1590         Q=C9/(W(J)^(1/X))
1600         GOSUB 1790
1610     NEXT J
1620 NEXT I
1630 NEXT U
1640 GOSUB 1970:I=1:U=1:JX=1
1645 '
1650 FOR U=1 TO 6
1660     CC=CC+1:COLOR 14,1:LOCATE CC,T(16+U):PRINT T$(16+U):COLOR 7,0
1670     FOR I=1 TO N1
1680         FOR JX=1 TO 2:G=2*(I-1)+JX
1690         CC=CC+1:IF CC>21 THEN 1700 ELSE 1710
1700         J=23:T=27:GOSUB 590:GOSUB 1970:CC=CC+1
1710         LOCATE CC,T(25)
1720         IF U=1 THEN PS(1)=P(1) ELSE PS(1)=P1
1730         PRINT USING F$;PS(I),Q2(U,G),W(JX),PB(U,G),X1(U,G),X2(U,G),X3(U,G),
P2(U,G),V(U,G),FI(U,G),HP(U,G),E(U,G)
1740     IF U=1 THEN 1760
1750     NEXT JX:NEXT I
1760 NEXT U
1770 J=23:T=27:GOSUB 590
1780 E1=E:CLS:GOTO 640
1785 '
1790 PB=PS(I)-C5*W(J)*Q^X
1800 A1=C7*(W(J)*Q^2/PB)^.5
1810 D=C8*A1^.5
1820 N2=INT((D-INT(D))*3+.5)

```

```

1830 FOR L=3 TO 1 STEP -1
1840   Y(L)=INT(D)+INT((N2+1)/3+.5)
1850   N2=N2-1
1860 NEXT L
1870 A2=C2*(Y(1)^2+Y(2)^2+Y(3)^2)
1880 P=C6*W(J)*Q^2/(A2^2)
1890 V=.32086*Q/A2
1900 FI=W(J)*Q*V/1932
1910 HP=P*Q/1714:EH=HP/A:G=2*(I-1)+J
1920 X1(U,G)=Y(1):X2(U,G)=Y(2):X3(U,G)=Y(3)
1930 Q2(U,G)=Q:PB(U,G)=PB:P2(U,G)=P
1940 V(U,G)=V:FI(U,G)=FI:HP(U,G)=HP:E(U,G)=EH
1950 RETURN
1955 '
1960 'SUBROUTINA PARA IMPRIMIR RESULTADOS HIDRAULICA PANTALLA
1970 CLS:COLOR 15,1
1980 FOR M=1 TO 4:LOCATE M,T(22+M):PRINT T$(22+M):NEXT M:COLOR 7,0
1990 CC=4:RETURN
1995 '
2000 'SUBROUTINA PARA IMPRIMIR RESULTADOS POR IMPRESORA
2020 LPRINT :LPRINT :GOSUB 2380
2030 T=5:GOSUB 2430
2040 LPRINT A$(1);TAB(32);A1$
2050 FOR I=1 TO 20
2060   LPRINT A$(I+1);TAB(31);USING "####.##";A(I)
2070   IF I=4 OR I=7 OR I=11 OR I=15 THEN LPRINT
2080 NEXT I
2090 LPRINT :T=7:GOSUB 2430
2100 LPRINT T$(9)
2110 FOR I=1 TO N
2120   LPRINT USING G$;P(I),Q(I),P0(I),PC(I)
2130 NEXT I
2135 '
2140 LPRINT CHR$(12):LPRINT:GOSUB 2380
2150 T=10:GOSUB 2430

```

```

2160 FOR I=1 TO 3
2170   LPRINT T$(11+I);TAB(31);USING "#.#####";R(I)
2180 NEXT I
2190 T=15:GOSUB 2430
2200 FOR I=1 TO 4
2210   LPRINT T$(16+I);TAB(31);USING "#.#####";F(I)
2220 NEXT I
2230 T=23:GOSUB 2430:T=25:GOSUB 2440
2235 '
2240 FOR U=1 TO 6
2250   JJ=(LEN(T$(25))-LEN(T$(16+U)))/2+1
2260   LPRINT TAB(JJ);T$(16+U)
2270   FOR I=1 TO N1
2280     FOR J=1 TO 2
2290       G=2*(I-1)+J
2300       IF U=1 THEN PS(1)=P(1) ELSE PS(1)=P1
2310       LPRINT USING F$;PS(I),Q2(U,G),W(J),PB(U,G),X1(U,G),X2(U,G),X3(U,G),
P2(U,G),V(U,G),FI(U,G),HP(U,G),E(U,G)
2320       IF U=1 THEN 2350
2330     NEXT J
2340   NEXT I
2350 NEXT U
2360 LPRINT CHR$(12)
2370 E1=E:GOTO 670
2375 '
2380 LPRINT :LPRINT :LPRINT T$(2):T=1
2390 GOSUB 2440:LPRINT:LPRINT
2400 FOR I=3 TO 4:LPRINT T$(I):NEXT I
2410 LPRINT DATE$;SPC(5);TIME$
2420 RETURN
2425 '
2430 LPRINT:LPRINT
2440 LPRINT T$(T):LPRINT T$(T+1)
2450 RETURN
2460 END

```

### 8.3. LISTADO DEL PROGRAMA PARA CALCULAR PROPIEDADES REOLOGICAS Y CAUDAL CRITICO DE LECHADAS DE CEMENTO

```
10 'PROGRAMA PROPIEDADES REOLOGICAS-CAUDAL CRITICO LECHADAS CE-
MENTO
20 COLOR 7,0,0:CLS:WIDTH 80:KEY OFF:OPTION BASE 1
25 '
30 DIM T$(25),R$(11),B$(15),Z$(15),A$(10),C$(10),X$(10),U$(10),Y$(10)
40 DIM T(25),A(10),U(11),B(15),X(15),L(11),R(11),P(10)
50 DIM E(11),F(11),D(12),RP(12),QP(12),R1(12),RB(12),QB(12),R2(12)
55 '
60 'DECLARACION DE VARIABLES DE CADENA
70 A$(1)="COMPOSICION LECHADA DE CEMENTO"
80 A$(2)="DATOS 2 LECTURAS ESFUERZO CORTE":A$(3)="DATOS 6 LECTURAS
ESFUERZO CORTE"
90 FOR I=4 TO 6:A$(I)="DATOS"+STR$(2*I-1)+" LECTURAS ESFUERZO CORTE":
NEXT I
100 A$(7)="CALCULAR REOLOGIA-CAUDAL CRITICO"
110 A$(8)="IMPRIMIR RESULTADOS"
120 A$(9)="TERMINAR PROGRAMA"
125 '
130 T$(1)="CAUDAL CRITICO LECHADA CEMENTO"
140 T$(3)="PROGRAMA MARZO 90 REV. DICIEMBRE 1995"
150 T$(4)="ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO-SELVA"
160 T$(5)=A$(1):T$(7)="DATOS POZO-REOMETRO FANN 35"
170 T$(9)="PROPIEDADES REOLOGICAS"
180 T$(11)="COEF. CORR. (LEY PTC)": T$(12)="N (ADIMENS)"
190 T$(13)="K (LB-S^N/P^2)": T$(14)="COEF. CORR. (BINGHAM)"
200 T$(15)="PV (CP)": T$(16)="YP (LB/100P^2)"
210 T$(17)="CAUDAL CRITICO MEZCLA"
220 T$(18)="DIAM. %% LEY DE POTENCIA %% %% PLASTICO BINGHAM %"
230 T$(19)="HUECO NRC CAUDL V.CORTE NRC CAUDL V.CORTE"
240 T$(20)=" (PG) ( ) (BPM) (RPM) ( ) (BPM) (RPM) "
250 F$="##.## ##### ##.## #####.## ##### ##.## #####.##"
260 T=1:GOSUB 280:T=5:GOSUB 280:T=7:GOSUB 280
```

```

270 T=9:GOSUB 280:T=20:GOSUB 280:GOTO 300
280 IF T=1 THEN I$="#" ELSE I$="%"
290 T$(T+1)=STRING$(LEN(T$(T)),I$):RETURN
300 T$(22)="PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
310 T$(23)="1.....INGRESAR NUEVOS DATOS  ( ).....CONTINUAR"
320 T$(24)="1.....GRABAR REGISTRO      ( ).....CONTINUAR"
330 T$(25)="SELECCIONAR UNA OPCION     ( )"
335 '
340 G$="###          ###"
350 FOR I=1 TO 9
360   A$(I)=STR$(I)+STRING$(40-LEN(A$(I)),".")+A$(I)
370   A(I)=(80-LEN(A$(I)))/2
380 NEXT I
385 '
390 FOR I=1 TO 25:T(I)=(80-LEN(T$(I)))/2:NEXT I
400 C$(1)="POZO":C$(2)="TIPO CEMENTO"
410 FOR I=1 TO 6:C$(I+2)="ADITIVO "+STR$(I):NEXT I
420 B$(1)="TEMP. CIRCUL. FONDO (°F)"
430 B$(2)="DIAM. BROCA      (PG)":B$(3)="DIAM. EXT. TUBERIA  (PG)"
440 B$(4)="PESO LECHADA     (LPG)":E1=0:GOTO 500
445 '
450 COLOR 15,1:LOCATE J,T(T):PRINT T$(T);:COLOR 7,0
460 IF T=22 THEN E$=INKEY$:IF E$="" THEN 460 ELSE 490
470 IF J=23 THEN E$=INPUT$(1):X=VAL(E$):GOTO 480 ELSE 490
480 LOCATE J,T(T):PRINT SPC(LEN(T$(T)))
490 RETURN
495 '
500 J=2:T=1:GOSUB 450
510 FOR I=1 TO 9:LOCATE 4+I,A(I):PRINT A$(I):NEXT I
520 J=16:T=25:GOSUB 450
530 X$=INPUT$(1):E=VAL(X$)
540 IF E<=0 OR E>9 THEN BEEP:GOTO 530 ELSE 550
550 IF E>=2 THEN 560 ELSE 570
560 IF E1=0 THEN BEEP:GOTO 530 ELSE 570
570 IF E=7 THEN IF E1>=2 AND E1<=6 THEN 580 ELSE BEEP:GOTO 530

```

```

580 ON E GOTO 590,840,840,840,840,840,1320,2120,2420
585 '
590 CLS:J=3:T=5:GOSUB 450
600 OPEN "COMCEM.DAT" FOR INPUT AS #1
610 INPUT #1,X$(1),X$(2),X$(3),X$(4),X$(5),X$(6),X$(7),X$(8)
620 CLOSE #1:FOR I=1 TO 8:U$(I)=X$(I):NEXT I
625 '
630 FOR I=1 TO 8:LOCATE 4+I,15:PRINT C$(I):NEXT I:COLOR 15,1
640 FOR I=1 TO 8:K=4+I
650     LOCATE K,30:PRINT SPC(16):LOCATE K,30:PRINT U$(I)
660     LOCATE K,50:PRINT SPC(16)
670 NEXT I
675 '
680 J=23:T=23:GOSUB 450
690 IF X=1 THEN 700 ELSE 810
700 COLOR 15,4
710 FOR I=1 TO 8:K=4+I
720     LOCATE K,50:INPUT "",P$ :IF P$<>"" THEN U$(I)=P$
730     IF P$="" THEN LOCATE K,50:PRINT U$(I)
740 NEXT I
745 '
750 J=23:T=24:GOSUB 450
760 IF X=1 THEN 770 ELSE 810
770 OPEN "COMCEM.DAT" FOR OUTPUT AS #1
780 FOR I=1 TO 8:X$(I)=U$(I):NEXT I
790 WRITE #1,X$(1),X$(2),X$(3),X$(4),X$(5),X$(6),X$(7),X$(8)
800 CLOSE #1
805 '
810 J=0:FOR I=1 TO 8:IF LEN(U$(I))>1 THEN J=J+1
820 NEXT I:J0=J
830 E1=E:CLS:GOTO 500
835 '
840 ON E-1 GOTO 850,860,870,870,870
850 N0=2:GOTO 880
860 N0=6:GOTO 880

```

```

870  N0=2*E-1:GOTO 940
875  '
880  OPEN "R",#2,"REOCEM6.DAT",40
890  FIELD #2,4 AS Y$(1),4 AS Y$(2),4 AS Y$(3),4 AS Y$(4),4 AS Y$(5),4 AS Y$(6),4
AS Y$(7),4 AS Y$(8),4 AS Y$(9),4 AS Y$(10)
900  GET #2,1:FOR I=1 TO 10:B(I)=CVS(Y$(I)):NEXT I
910  GOSUB 920:GOSUB 1000:GOTO 1040
920  RESTORE 930:FOR I=1 TO N0:READ X:U(I)=X:R$(I)=STR$(X):NEXT I:RETURN
930  DATA 600,300,200,100,6,3
935  '
940  OPEN "R",#3,"REOCEM11.DAT",60
950  FIELD #3,4 AS Z$(1),4 AS Z$(2),4 AS Z$(3),4 AS Z$(4),4 AS Z$(5),4 AS Z$(6),4
AS Z$(7),4 AS Z$(8),4 AS Z$(9),4 AS Z$(10),4 AS Z$(11),4 AS Z$(12),4 AS Z$(13),4 AS
Z$(14),4 AS Z$(15)
960  GET #3,1:FOR I=1 TO 15:B(I)=CVS(Z$(I)):NEXT I
970  GOSUB 980:GOSUB 1000:GOTO 1040
980  RESTORE 990:FOR I=1 TO N0:READ X:U(I)=X:R$(I)=STR$(X):NEXT I:RETURN
990  DATA 300,200,180,100,90,60,30,6,3,1.8,0.9
1000 FOR I=1 TO N0
1010 B$(4+I)="LECT. @"+SPACE$(8-LEN(R$(I)))+R$(I)+SPACE$(5)+"RPM "
1020 NEXT I:J1=N0+4
1030 RETURN
1035 '
1040 CLS:J=2:T=7:GOSUB 450
1050 FOR I=1 TO J1:LOCATE 3+I,10:PRINT B$(I):NEXT I:COLOR 15,1
1060 FOR I=1 TO J1:K=3+I
1070   LOCATE K,40:PRINT SPC(10):LOCATE K,40:PRINT USING "###.##";B(I)
1080   LOCATE K,55:PRINT SPC(20)
1090 NEXT I
1095 '
1100 J=23:T=23:GOSUB 450
1110 IF X=1 THEN COLOR 15,4:GOTO 1120 ELSE 1240
1120 FOR I=1 TO J1:K=3+I
1130   LOCATE K,55:INPUT "",X$:IF X$<>"" THEN 1140 ELSE 1160
1140   IF VAL(X$)<=0 THEN 1150 ELSE 1160

```

```

1150 BEEP:LOCATE K,55:PRINT SPC(10):GOTO 1130
1160 X(I)=VAL(X$):IF X(I)=0 THEN LOCATE K,65:PRINT USING "###.##";B(I)
1170 IF X(I)>0 THEN LOCATE K,65:PRINT USING "###.##";X(I)
1180 NEXT I
1190 FOR I=1 TO J1:IF X(I)>0 THEN B(I)=X(I) ELSE 1200
1200 NEXT I
1205 '
1210 J=23:T=24:GOSUB 450
1220 IF X=1 THEN 1230 ELSE 1240
1230 IF E=2 OR E=3 THEN 1250 ELSE 1280
1240 IF E=2 OR E=3 THEN 1270 ELSE 1300
1250 FOR I=1 TO 10:LSET Y$(I)=MK$(B(I)):NEXT I
1260 PUT #2,1
1270 CLOSE #2:GOTO 1310
1280 FOR I=1 TO 15:LSET Z$(I)=MK$(B(I)):NEXT I
1290 PUT #3,1
1300 CLOSE #3
1310 E1=E:CLS:GOTO 500
1315 '
1320 CLS:J=0
1330 FOR I=5 TO J1
1340 J=J+1:L(J)=B(I):R(J)=VAL(R$(J))
1350 NEXT I:N=J
1360 D0=B(2):D1=B(3):WC=B(4)
1365 '
1370 S1=0:S2=0:S3=0:S4=0:S5=0
1380 Z1=0:Z2=0:Z3=0:Z4=0:Z5=0
1390 FOR I=1 TO N
1400 E(I)=1.7023*R(I):F(I)=.01065*L(I)
1410 S1=S1+LOG(E(I))
1420 S2=S2+LOG(F(I))
1430 S3=S3+LOG(E(I))*LOG(F(I))
1440 S4=S4+(LOG(E(I)))^2
1450 S5=S5+(LOG(F(I)))^2
1460 Z1=Z1+E(I)

```

```

1470   Z2=Z2+F(I)
1480   Z3=Z3+E(I)*F(I)
1490   Z4=Z4+(E(I))^2
1500   Z5=Z5+(F(I))^2
1510  NEXT I
1515  '
1520  C2=(N*Z3-Z1*Z2)/(((N*Z4-Z1^2)*(N*Z5-Z2^2))^.5)
1530  PC=47880.26*(Z1*Z2-N*Z3)/(Z1^2-N*Z4)
1540  YC=100*(Z1*Z3-Z2*Z4)/(Z1^2-N*Z4)
1550  IF YC<0 THEN YC=0
1560  C1=(N*S3-S1*S2)/(((N*S4-S1^2)*(N*S5-S2^2))^.5)
1570  NC=(S1*S2-N*S3)/(S1^2-N*S4)
1580  B=(S1*S3-S2*S4)/(S1^2-N*S4)
1590  KC=(EXP(B))*((3*NC+1)/(4*NC))^NC
1600  P(1)=C1:P(2)=NC:P(3)=KC
1610  P(4)=C2:P(5)=PC:P(6)=YC
1620  IF NC>1 THEN RP=3000:J=0:GOTO 1650
1630  IF NC>=0 AND NC<.25 THEN RP=3800:J=0:GOTO 1650
1640  RP=3000+INT(10*(1-NC))*100:J=0
1645  '
1650  FOR I=1 TO 11 STEP 2
1660   D(I)=D0+.5*J:D(I+1)=D(I)
1670   RP(I)=100:RP(I+1)=RP
1680   RB(I)=100:J=J+1
1690  NEXT I
1700  F1=3.7*10^4*(YC*WC/PC^2)
1705  '
1710  FOR I=2 TO 12 STEP 2
1720   H=F1*(D(I)-D1)^2
1730   IF H>=0 AND H<10^3 THEN RB(I)=2100:GOTO 1870
1740   IF H>=10^3 AND H<10^4 THEN 1750 ELSE 1760
1750   H=H/10^3:N1=2100:N2=25/21:N3=1:N4=9:GOTO 1860
1760   IF H>=10^4 AND H<2.7*10^4 THEN 1770 ELSE 1780
1770   H=H/10^4:N1=2500:N2=28/25:N3=1:N4=1.7:GOTO 1860
1780   IF H>=2.7*10^4 AND H<10^5 THEN 1790 ELSE 1800

```

```

1790 H=H/10^4:N1=2800:N2=7/2:N3=2.7:N4=7.3:GOTO 1860
1800 IF H>=10^5 AND H<10^6 THEN 1810 ELSE 1820
1810 H=H/10^5:N1=7000:N2=205/70:N3=1:N4=9:GOTO 1860
1820 IF H>=10^6 AND H<10^7 THEN 1830 ELSE 1840
1830 H=H/10^6:N1=20500:N2=690/205:N3=1:N4=9:GOTO 1860
1840 IF H>=10^7 AND H<=10^8 THEN 1850 ELSE END
1850 H=H/10^7:N1=69000!:N2=235/69:N3=1:N4=9:GOTO 1860
1860 RB(I)=N1*N2^((H-N3)/N4)
1870 NEXT I
1875 '
1880 F2=1/(2-NC):F3=(KC*96^NC/(1.86*WC))^F2
1890 F4=6.283*PC/(10^5*WC)
1900 FOR I=1 TO 12
1910 D2=D(I)-D1:D3=D(I)^2-D1^2:D4=D(I)+D1
1920 VP=F3*(RP(I)/(D2)^NC)^F2
1930 QP(I)=.05828*D3*VP
1940 R1(I)=84.6*VP/D2
1950 QB(I)=F4*RB(I)*D4
1960 VB=17.157*QB(I)/D3
1970 R2(I)=84.6*VB/D2
1980 NEXT I
1985 '
1990 J=1:T=9:GOSUB 450:Y=1
2000 FOR I=1 TO 6:Y=Y+1
2010 LOCATE Y,T(20):PRINT T$(10+I)
2020 LOCATE Y,57:PRINT USING "##.#####";P(I)
2030 NEXT I
2035 '
2040 Y=Y+2:J=Y:T=17:GOSUB 450:COLOR 15,1
2050 FOR I=1 TO 3:Y=Y+1:LOCATE Y,T(17+I):PRINT T$(17+I):NEXT I:COLOR 7,0
2060 FOR I=1 TO 12:Y=Y+1
2070 LOCATE Y,T(20)
2080 PRINT USING F$:D(I),RP(I),QP(I),R1(I),RB(I),QB(I),R2(I);
2090 NEXT I
2100 J=Y+1:T=22:GOSUB 450

```

```

2110 E1=E:CLS:GOTO 500
2115 '
2120 'SUBROUTINA PARA IMPRESION DE RESULTADOS
2140 LPRINT :LPRINT :GOSUB 2340
2150 T=5:GOSUB 2380
2160 FOR I=1 TO J0
2170     LPRINT C$(I);TAB(31);U$(I)
2180 NEXT I
2190 T=7:GOSUB 2380
2200 FOR I=1 TO J1
2210     LPRINT B$(I);TAB(30);USING "###.##";B(I)
2220 NEXT I
2225 '
2230 LPRINT CHR$(12):LPRINT :GOSUB 2340
2240 T=9:GOSUB 2380
2250 FOR I=1 TO 6
2260     LPRINT T$(10+I);TAB(30);USING "##.#####";P(I)
2270 NEXT I
2280 T=18:GOSUB 2380:T=20:GOSUB 2390
2290 FOR I=1 TO 12
2300     LPRINT USING F$;D(I),RP(I),QP(I),R1(I),RB(I),QB(I),R2(I)
2310 NEXT I
2320 LPRINT CHR$(12)
2330 E1=E:GOTO 530
2335 '
2340 LPRINT :LPRINT :LPRINT T$(2):T=1:GOSUB 2390
2350 LPRINT :LPRINT :FOR I=3 TO 4:LPRINT T$(I):NEXT I
2360 LPRINT DATE$;SPC(5);TIME$
2370 RETURN
2380 LPRINT :LPRINT
2390 LPRINT T$(T)
2400 LPRINT T$(T+1)
2410 RETURN
2420 END

```

## **9. ANEXOS**

Se adjuntan las impresiones de datos y resultados de ejemplos de aplicación de los programas, relación de referencias de bibliografía, gráficos y tablas sobre los temas tratados en este trabajo y el programa para cementación de la lina de 7" en el pozo 160D-Corrientes.

HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM

- 1.....DATOS TUBERIAS-GEOMETRIA DE POZO
- 2.....PROPIEDADES FLUIDO DE PERFORACION
- 3.....PRESION SUPERFICIE CONSTANTE
- 4.....CAUDAL DE FLUJO CONSTANTE
- 5.....CAUDAL-PRESION CONSTANTE
- 6.....BOQUILLAS-CAUDAL CONSTANTE
- 7.....BOQUILLAS-PRESION CONSTANTE
- 8.....ENERGIA HSI BROCA CONSTANTE
- 9.....PRESION-ENERGIA HSI CONSTANTE
- 10.....CAUDAL-ENERGIA HSI CONSTANTE
- 11.....BOQUILLAS-ENERGIA HSI CONSTANTE
- 12.....IMPRIMIR RESULTADOS
- 13.....TERMINAR PROGRAMA

SELECCIONAR UNA OPCION .....[ 1 ]

DATOS TUBERIAS-GEOMETRIA DE POZO

NOMBRE POZO		161D-CHAMB	
NUM. SECC.	TUBERIA PESADA	3.00	3.00
LONGITUD	1 (P)	450.00	450.00
DIAM. EXT.	1 (PG)	4.50	4.50
DIAM. INT.	1 (PG)	2.75	2.75
LONGITUD	2 (P)	120.00	120.00
DIAM. EXT.	2 (PG)	6.50	6.50
DIAM. INT.	2 (PG)	2.81	2.81
LONGITUD	3 (P)	150.00	150.00
DIAM. EXT.	3 (PG)	8.00	8.00
DIAM. INT.	3 (PG)	2.81	2.81
TUBERIA DIAM. EXT.	(PG)	4.50	4.50
TUBERIA DIAM. INT.	(PG)	3.83	3.83
FORROS PROF. ZAP.	(P)	1960.00	1960.00
FORROS DIAM. EXT.	(PG)	12.72	12.72
BROCA DIAM. EXT.	(PG)	12.25	12.25
PROF. HUECO INIC.	(P)	2000.00	2000.00
PROF. HUECO FINAL	(P)	10000.00	10000.00
PENDIENTE	LOG(PC)-LOG(Q)	1.86	1.86

1....GRABAR REGISTRO

( ).....CONTINUAR

HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM

- 1.....DATOS TUBERIAS-GEOMETRIA DE POZO
- 2.....PROPIEDADES FLUIDO DE PERFORACION
- 3.....PRESION SUPERFICIE CONSTANTE
- 4.....CAUDAL DE FLUJO CONSTANTE
- 5.....CAUDAL-PRESION CONSTANTE
- 6.....BOQUILLAS-CAUDAL CONSTANTE
- 7.....BOQUILLAS-PRESION CONSTANTE
- 8.....ENERGIA HSI BROCA CONSTANTE
- 9.....PRESION-ENERGIA HSI CONSTANTE
- 10.....CAUDAL-ENERGIA HSI CONSTANTE
- 11.....BOQUILLAS-ENERGIA HSI CONSTANTE
- 12.....IMPRIMIR RESULTADOS
- 13.....TERMINAR PROGRAMA

SELECCIONAR UNA OPCION .....[ 2 ]

PROPIEDADES FLUIDO PERFORACION

PROF (P)	PESO (LPG)		PV (CP)	YP (LB/ 100 P^2)		
2000	9.00	9.00	14.00	14.00	15.00	15.00
3000	9.00	9.00	14.00	14.00	15.00	15.00
4000	9.20	9.20	15.00	15.00	15.00	15.00
5000	9.20	9.20	15.00	15.00	15.00	15.00
6000	9.40	9.40	15.00	15.00	15.00	15.00
7000	9.60	9.60	16.00	16.00	15.00	15.00
8000	9.80	9.80	16.00	16.00	15.00	15.00
9000	10.00	10.00	18.00	18.00	15.00	15.00
10000	10.20	10.20	18.00	18.00	15.00	15.00

1.....GRABAR REGISTRO

( ).....CONTINUAR

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:08:41

DATOS TUBERIAS-GEOMETRIA DE POZO

			161D-CHAMB
*****			
NOMBRE POZO			
NUM. SECC.	TUBERIA PESADA		3.00
LONGITUD	1 (P)		450.00
DIAM. EXT.	1 (PG)		4.50
DIAM. INT.	1 (PG)		2.75
LONGITUD	2 (P)		120.00
DIAM. EXT.	2 (PG)		6.50
DIAM. INT.	2 (PG)		2.81
LONGITUD	3 (P)		150.00
DIAM. EXT.	3 (PG)		8.00
DIAM. INT.	3 (PG)		2.81
TUBERIA DIAM. EXT.	(PG)		4.50
TUBERIA DIAM. INT.	(PG)		3.83
FORROS PROF. ZAP.	(P)		1960.00
FORROS DIAM. EXT.	(PG)		12.72
BROCA DIAM. EXT.	(PG)		12.25
PROF. HUECO INIC.	(P)		2000.00
PROF. HUECO FINAL.	(P)		10000.00
PENDIENTE LOG(PC)-LOG(Q)			1.86

PROF (P)	PESO (LPG)	PV (CP)	YP (LB/ 100 P^2)
*****			
2000	9.00	14.0	15.0
3000	9.00	14.0	15.0
4000	9.20	15.0	15.0
5000	9.20	15.0	15.0
6000	9.40	15.0	15.0
7000	9.60	16.0	15.0
8000	9.80	16.0	15.0
9000	10.00	18.0	15.0
10000	10.20	18.0	15.0

HIDRAULICA OPTIMA		(PB/PS)
*****		
POTENCIA HIDRAULI		0.6503
FUERZA IMPACTO 1		0.4819
FUERZA IMPACTO 2		0.7409

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:06:31

PRESION SUPERFICIE CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
POTENCIA HIDRAULI												
2000	743.5	1083	2017	3100	14 14 15	2046	1746	888	7.53	9.2	7299	8383
3000	662.3	1083	2017	3100	13 14 14	1964	1524	759	6.44	9.2	6502	8383
4000	587.2	1077	2023	3100	13 13 13	1932	1355	662	5.62	9.4	5500	8079
5000	541.7	1084	2016	3100	12 12 13	2024	1279	640	5.43	9.4	5074	8079
6000	497.8	1085	2015	3100	12 12 12	1954	1167	567	4.81	9.6	4763	8134
7000	457.0	1086	2014	3100	11 11 12	2106	1125	562	4.76	9.8	4187	7860
8000	425.7	1086	2014	3100	11 11 11	2110	1060	524	4.45	10.0	3982	7912
9000	392.3	1087	2013	3100	10 11 11	2060	974	471	4.00	10.2	3328	7391
10000	368.9	1087	2013	3100	10 10 11	2108	936	454	3.85	10.4	3192	7438
FUERZA IMPACTO 1												
2000	947.6	1603	1497	3100	17 18 18	1441	1868	797	6.76	9.2	9303	8383
3000	846.7	1606	1494	3100	16 17 17	1452	1675	717	6.09	9.2	8312	8383
4000	755.1	1604	1496	3100	15 16 16	1512	1541	666	5.65	9.4	7072	8079
5000	693.9	1600	1500	3100	15 15 15	1522	1421	616	5.23	9.4	6499	8079
6000	639.8	1603	1497	3100	14 15 15	1443	1290	539	4.57	9.6	6122	8134
7000	589.5	1607	1493	3100	14 14 14	1510	1228	519	4.41	9.8	5401	7860
8000	550.4	1607	1493	3100	13 14 14	1477	1146	474	4.02	10.0	5148	7912
9000	508.6	1608	1492	3100	13 13 14	1420	1049	421	3.58	10.2	4315	7391
10000	479.5	1608	1492	3100	13 13 13	1428	1001	399	3.39	10.4	4149	7438
FUERZA IMPACTO 2												
2000	611.4	800	2300	3100	12 13 13	2267	1511	809	6.86	9.2	6002	8383
3000	544.6	803	2297	3100	12 12 12	2239	1338	711	6.04	9.2	5346	8383
4000	483.5	804	2296	3100	11 11 12	2260	1207	638	5.41	9.4	4529	8079
5000	443.0	805	2295	3100	10 11 11	2416	1143	624	5.30	9.4	4149	8079
6000	405.9	805	2295	3100	10 10 11	2353	1045	557	4.73	9.6	3884	8134
7000	371.5	805	2295	3100	10 10 10	2304	956	499	4.24	9.8	3403	7860
8000	345.0	805	2295	3100	9 10 10	2313	899	466	3.95	10.0	3227	7912
9000	316.7	805	2295	3100	9 9 10	2287	829	423	3.59	10.2	2687	7391
10000	296.8	805	2295	3100	9 9 9	2382	800	412	3.50	10.4	2568	7438

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:10:36

CAUDAL-PRESION CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
2000	590.0	758	2342	3100	12 12 13	2348	1484	808	6.86	9.2	5792	8383
3000	590.0	906	2194	3100	12 13 13	2111	1407	727	6.17	9.2	5792	8383
4000	590.0	1084	2016	3100	13 13 13	1951	1368	671	5.70	9.4	5526	8079
5000	590.0	1237	1863	3100	13 13 13	1951	1368	671	5.70	9.4	5526	8079
6000	590.0	1410	1690	3100	13 14 14	1628	1263	560	4.75	9.6	5646	8134
7000	590.0	1609	1491	3100	14 14 14	1513	1231	521	4.42	9.8	5406	7860
8000	590.0	1794	1306	3100	14 15 15	1280	1143	441	3.74	10.0	5518	7912
9000	590.0	2033	1067	3100	15 15 16	1093	1068	376	3.19	10.2	5005	7391
10000	590.0	2232	868	3100	16 16 17	866	960	298	2.53	10.4	5106	7438

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:11:57

BOQUILLAS-CAUDAL CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
2000	590.0	758	1076	1835	15 15 15	1076	1005	371	3.14	9.2	5792	8383
3000	590.0	906	1076	1983	15 15 15	1076	1005	371	3.14	9.2	5792	8383
4000	590.0	1084	1100	2185	15 15 15	1100	1027	379	3.21	9.4	5526	8079
5000	590.0	1237	1100	2337	15 15 15	1100	1027	379	3.21	9.4	5526	8079
6000	590.0	1410	1124	2534	15 15 15	1124	1050	387	3.28	9.6	5646	8134
7000	590.0	1609	1148	2757	15 15 15	1148	1072	395	3.35	9.8	5406	7860
8000	590.0	1794	1172	2966	15 15 15	1172	1094	403	3.42	10.0	5518	7912
9000	590.0	2033	1196	3229	15 15 15	1196	1117	412	3.49	10.2	5005	7391
10000	590.0	2232	1220	3452	15 15 15	1220	1139	420	3.56	10.4	5106	7438

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:13:39

BOQUILLAS-PRESION CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
2000	786.6	1182	1913	3095	15 15 15	1913	1786	878	7.45	9.2	7712	8383
3000	755.5	1333	1765	3098	15 15 15	1765	1648	778	6.60	9.2	7413	8383
4000	716.9	1473	1625	3098	15 15 15	1625	1517	680	5.77	9.4	6710	8079
5000	691.2	1586	1510	3096	15 15 15	1510	1410	609	5.17	9.4	6465	8079
6000	661.0	1690	1411	3101	15 15 15	1411	1317	544	4.62	9.6	6326	8134
7000	630.5	1789	1311	3100	15 15 15	1311	1224	482	4.09	9.8	5778	7860
8000	605.0	1870	1232	3102	15 15 15	1232	1151	435	3.69	10.0	5664	7912
9000	576.5	1956	1142	3098	15 15 15	1142	1066	384	3.26	10.2	4887	7391
10000	554.6	2023	1078	3101	15 15 15	1078	1006	349	2.96	10.4	4802	7438

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:15:21

ENERGIA HSI BROCA CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
POTENCIA HIDRAULI												
2000	637.5	851	1586	2437	14 14 14	1656	1347	616	5.23	9.2	6252	8383
3000	593.9	913	1704	2617	13 13 14	1743	1287	604	5.12	9.2	5819	8383
4000	553.2	980	1829	2809	12 13 13	1897	1265	612	5.20	9.4	5172	8079
5000	525.2	1033	1926	2958	12 12 13	1902	1202	583	4.95	9.4	4913	8079
6000	499.0	1087	2027	3114	12 12 12	1963	1173	572	4.85	9.6	4769	8134
7000	473.9	1144	2134	3278	11 12 12	2018	1142	558	4.73	9.8	4337	7860
8000	454.2	1194	2226	3420	11 11 12	2125	1134	563	4.78	10.0	4245	7912
9000	432.7	1254	2337	3591	11 11 11	2224	1117	562	4.76	10.2	3667	7391
10000	417.2	1301	2423	3723	10 11 11	2377	1124	579	4.91	10.4	3608	7438
FUERZA IMPACTO 1												
2000	833.6	1307	1208	2515	17 17 18	1203	1501	585	4.97	9.2	8211	8383
3000	777.9	1392	1302	2694	16 16 17	1329	1472	603	5.12	9.2	7613	8383
4000	724.9	1494	1398	2891	15 16 16	1393	1420	589	5.00	9.4	6768	8079
5000	688.5	1574	1470	3044	15 15 15	1499	1399	602	5.11	9.4	6435	8079
6000	654.3	1656	1547	3203	14 15 15	1510	1349	576	4.89	9.6	6249	8134
7000	621.8	1743	1628	3371	14 14 14	1680	1367	610	5.17	9.8	5685	7860
8000	596.1	1819	1697	3516	13 14 14	1733	1344	603	5.11	10.0	5567	7912
9000	568.1	1908	1781	3689	13 13 14	1772	1309	587	4.98	10.2	4811	7391
10000	548.0	1979	1845	3825	13 13 13	1866	1308	597	5.06	10.4	4736	7438
FUERZA IMPACTO 2												
2000	536.1	660	1881	2541	12 12 13	1939	1225	606	5.14	9.2	5270	8383
3000	499.4	706	2025	2731	11 12 12	2100	1188	612	5.19	9.2	4897	8383
4000	465.1	759	2174	2933	11 11 12	2091	1116	567	4.81	9.4	4351	8079
5000	441.4	800	2290	3090	10 11 11	2399	1135	618	5.24	9.4	4131	8079
6000	419.2	842	2411	3253	10 10 11	2510	1114	614	5.21	9.6	4009	8134
7000	398.0	887	2539	3426	10 10 10	2646	1098	614	5.21	9.8	3644	7860
8000	381.4	926	2650	3575	10 10 10	2479	1029	552	4.68	10.0	3565	7912
9000	363.1	972	2783	3755	9 10 10	2615	1016	554	4.70	10.2	3079	7391
10000	350.1	1008	2887	3895	9 9 10	2851	1033	582	4.94	10.4	3028	7438

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:17:10

PRESION-ENERGIA HSI CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
2000	374.8	405	2695	3100	9 10 10	2506	974	548	4.65	9.2	3672	8383
3000	388.5	500	2600	3100	9 10 10	2693	1047	610	5.18	9.2	3810	8383
4000	409.2	632	2468	3100	10 10 11	2341	1039	559	4.74	9.4	3820	8079
5000	435.5	781	2319	3100	10 11 11	2336	1105	594	5.04	9.4	4063	8079
6000	507.7	1110	1990	3100	12 12 12	2032	1214	602	5.11	9.6	4837	8134

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:18:34

CAUDAL-ENERGIA HSI CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
2000	590.0	758	1712	2470	13 13 14	1720	1270	592	5.02	9.2	5792	8383
3000	590.0	906	1712	2618	13 13 14	1720	1270	592	5.02	9.2	5792	8383
4000	590.0	1084	1712	2796	13 13 14	1758	1299	605	5.14	9.4	5526	8079
5000	590.0	1237	1712	2949	13 13 14	1758	1299	605	5.14	9.4	5526	8079
6000	590.0	1410	1712	3122	13 14 14	1628	1263	560	4.75	9.6	5646	8134
7000	590.0	1609	1712	3321	13 14 14	1662	1290	572	4.86	9.8	5406	7860
8000	590.0	1794	1712	3506	13 14 14	1697	1317	584	4.96	10.0	5518	7912
9000	590.0	2033	1712	3745	13 14 14	1732	1344	596	5.06	10.2	5005	7391
10000	590.0	2232	1712	3944	13 14 14	1766	1370	608	5.16	10.4	5106	7438

#####  
 HIDRAULICA PERFORACION : FLUIDO BINGHAM  
 #####

PROGRAMA MAYO 92 REV. AGOSTO 1996  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:22:07

BOQUILLAS-ENERGIA HSI CONSTANTE

PRF (P)	CAUD (GPM)	POPT CIRC (PSI)	POPT BROC (PSI)	POPT SUPF (PSI)	DIAM BOQUI (1/32)	PRES BROC (PSI)	FZA IPT (LB)	HP BRO (HP)	ENG ESP HSI	PES EQV (LPG)	NR H-DC	NRC H-DC
2000	688.7	960	1467	2427	15 15 15	1467	1369	589	5.00	9.2	6761	8383
3000	688.7	1152	1467	2618	15 15 15	1467	1369	589	5.00	9.2	6761	8383
4000	683.6	1367	1477	2844	15 15 15	1477	1379	589	5.00	9.4	6403	8079
5000	683.6	1562	1477	3039	15 15 15	1477	1379	589	5.00	9.4	6403	8079
6000	678.8	1763	1488	3251	15 15 15	1488	1389	589	5.00	9.6	6496	8134
7000	674.0	1992	1499	3490	15 15 15	1499	1399	589	5.00	9.8	6176	7860
8000	669.4	2199	1509	3707	15 15 15	1509	1409	589	5.00	10.0	6261	7912
9000	664.9	2467	1519	3986	15 15 15	1519	1418	589	5.00	10.2	5641	7391
10000	660.5	2682	1529	4211	15 15 15	1529	1428	589	5.00	10.4	5716	7438

DIAMETROS OPTIMOS BOQUILLAS BROCA

- 1.....DATOS BOQUILLAS,PRESION,CAUDAL
- 2.....CALCULAR HIDRAULICA OPTIMA BROCA
- 3.....RESULTADOS POR IMPRESORA
- 4.....TERMINAR PROGRAMA

SELECCIONAR UNA OPCION.....( )

		PESO LODO,DIAM.BOQUILLAS,PRESION,CAUDAL	
NOMBRE POZO		158D-CHAMB	
ACT.	PESO LODO (LPG)	10.40	10.40
PROX.	PESO LODO (LPG)	10.50	10.50
TUBERIA	DIAM. EXT. (PG)	4.50	4.50
BROCA	DIAM. (PG)	12.25	12.25
BOQUI.	DIAM. (1/32 PG)	17.60	17.60
BOQUI.	DIAM. (1/32 PG)	17.60	17.60
BOQUI.	DIAM. (1/32 PG)	17.60	17.60
PRESION	SUP. 1 (PSI)	2880.00	2880.00
PRESION	SUP. 2 (PSI)	2580.00	2580.00
PRESION	SUP. 3 (PSI)	2280.00	2280.00
PRESION	SUP. 4 (PSI)	1980.00	1980.00
CAUDAL	LODO 1 (GPM)	580.00	580.00
CAUDAL	LODO 2 (GPM)	543.00	543.00
CAUDAL	LODO 3 (GPM)	505.00	505.00
CAUDAL	LODO 4 (GPM)	468.00	468.00
NUM. PUNTOS	REGRES (2-4)	4.00	4.00
PRESION	MAX. (PSI)	3100.00	3100.00
PRESION	MAX. (PSI)	3500.00	3500.00
CAUDAL	VAR. (GPM)	590.00	590.00
CAUDAL	VAR. (GPM)	650.00	650.00

1.....GRABAR REGISTRO

( ).....CONTINUAR

PRES SUP. (PSI)	CAUDAL (GPM)	BROCA (PSI)	PARAS (PSI)
2880.0	580.0	634.3	2245.7
2580.0	543.0	555.9	2024.1
2280.0	505.0	480.8	1799.2
1980.0	468.0	413.0	1567.0

REGRESION LOG-LOG

COEF. CORRELACION	0.99944
PENDIENTE RECTA	1.67320
INTERCEP. EJE LOG (PC)	0.05350
HIDRAULICA OPTIMA	(PB/PS)
HIDRAULICA ACTUAL	0.22023
POTENCIA HIDRAULI	0.62592
FUERZA IMPACTO 1	0.45552
FUERZA IMPACTO 2	0.72776

PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR

*****											
PS	QOPT	PESO	PBOP	BOQUI			BROC	VEL	FZA	*****	
(PSI)	(GPM)	(LPG)	(PSI)	(1/32 PG)			(PSI)	(PPS)	(LB)	%% BROCA	%%
*****											
HIDRAULICA ACTUAL											
2880	580.0	10.4	634	17	18	18	624	259	808	211.1	1.79
POTENCIA HIDRAULI											
3100	390.3	10.4	1940	11	11	11	1883	450	945	428.7	3.64
3100	388.1	10.5	1940	11	11	11	1879	447	943	425.5	3.61
3500	419.7	10.4	2191	11	11	11	2176	484	1093	532.9	4.52
3500	417.3	10.5	2191	11	11	11	2172	481	1091	528.9	4.49
FUERZA IMPACTO 1											
3100	488.5	10.4	1412	13	13	14	1363	383	1006	388.3	3.29
3100	485.7	10.5	1412	13	13	14	1360	381	1004	385.4	3.27
3500	525.2	10.4	1594	13	13	14	1575	411	1163	482.7	4.10
3500	522.2	10.5	1594	13	13	14	1572	409	1161	479.1	4.06
FUERZA IMPACTO 2											
3100	322.8	10.4	2256	9	10	10	2149	481	835	404.7	3.43
3100	321.0	10.5	2256	9	10	10	2145	478	834	401.6	3.41
3500	347.1	10.4	2547	9	10	10	2484	517	965	503.1	4.27
3500	345.1	10.5	2547	9	10	10	2480	514	964	499.3	4.24

CAUDAL MINIMO  
PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR

*****											
PS	QOPT	PESO	PBOP	BOQUI			PRES	VEL	FZA	*****	
(PSI	(GPM)	(LPG	(PSI	(1/32 PG)			BROC	BOQ	IP	%% BROCA	%%
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
3100	489.1	10.4	1409	13	13	14	1366	383	1009	389.7	3.31
3100	484.4	10.5	1420	13	13	14	1353	380	999	382.4	3.24
3500	489.1	10.4	1809	12	12	13	1865	448	1179	532.1	4.52
3500	484.4	10.5	1820	12	12	13	1847	443	1167	522.0	4.43
CAUDAL VARIABLE											
3100	590.0	10.4	785	16	17	17	815	296	940	280.5	2.38
3100	590.0	10.5	763	17	17	17	761	285	913	262.0	2.22
3500	650.0	10.4	778	17	18	18	784	290	1015	297.1	2.52
3500	650.0	10.5	752	18	18	18	735	280	988	278.8	2.37

PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR

#####  
 DIAMETROS OPTIMOS BOQUILLAS BROCA  
 #####

PROGRAMA JUNIO 91 REV. AGOSTO 1995  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:27:12

PESO LODO,DIAM.BOQUILLAS,PRESION,CAUDAL  
 %%

NOMBRE POZO			158D-CHAMB
ACT. PESO LODO	(LPG)		10.40
PROX. PESO LODO	(LPG)		10.50
TUBERIA DIAM. EXT.	(PG)		4.50
BROCA DIAM.	(PG)		12.25
BOQUI. DIAM.	(1/32 PG)		17.60
BOQUI. DIAM.	(1/32 PG)		17.60
BOQUI. DIAM.	(1/32 PG)		17.60
PRESION SUP. 1	(PSI)		2880.00
PRESION SUP. 2	(PSI)		2580.00
PRESION SUP. 3	(PSI)		2280.00
PRESION SUP. 4	(PSI)		1980.00
CAUDAL LODO 1	(GPM)		580.00
CAUDAL LODO 2	(GPM)		543.00
CAUDAL LODO 3	(GPM)		505.00
CAUDAL LODO 4	(GPM)		468.00
NUM. PUNTOS REGRES	(2-4)		4.00
PRESION MAX.	(PSI)		3100.00
PRESION MAX.	(PSI)		3500.00
CAUDAL VAR.	(GPM)		590.00
CAUDAL VAR.	(GPM)		650.00

PRES SUP.	CAUDAL	BROCA	PARAS
(PSI)	(GPM)	(PSI)	(PSI)
2880.0	580.0	634.3	2245.7
2580.0	543.0	555.9	2024.1
2280.0	505.0	480.8	1799.2
1980.0	468.0	413.0	1567.0

#####  
 DIAMETROS OPTIMOS BOQUILLAS BROCA  
 #####

PROGRAMA JUNIO 91 REV. AGOSTO 1995  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO SELVA  
 12-26-1996 14:27:12

REGRESION LOG-LOG  
 %%%%%%%%%%  
 COEF. CORRELACION 0.99944  
 PENDIENTE RECTA 1.67320  
 INTERCEP. EJE LOG (PC) 0.05350

HIDRAULICA OPTIMA (PB/PS)  
 %%%%%%%%%%  
 HIDRAULICA ACTUAL 0.22023  
 POTENCIA HIDRAULI 0.62592  
 FUERZA IMPACTO 1 0.45552  
 FUERZA IMPACTO 2 0.72776

%%%%%%%%%											
PS	QOPT	PESO	PBOP	BOQUI			BROC	BOQ	FZA	%%%%%%%%%	
(PSI	(GPM)	(LPG	(PSI	(1/32 PG)			(PSI	(PPS	(LB	%% BROCA %%	
%%%%%%%%%											
HIDRAULICA ACTUAL											
2880	580.0	10.4	634	17	18	18	624	259	808	211.1	1.79
POTENCIA HIDRAULI											
3100	390.3	10.4	1940	11	11	11	1883	450	945	428.7	3.64
3100	388.1	10.5	1940	11	11	11	1879	447	943	425.5	3.61
3500	419.7	10.4	2191	11	11	11	2176	484	1093	532.9	4.52
3500	417.3	10.5	2191	11	11	11	2172	481	1091	528.9	4.49
FUERZA IMPACTO 1											
3100	488.5	10.4	1412	13	13	14	1363	383	1006	388.3	3.29
3100	485.7	10.5	1412	13	13	14	1360	381	1004	385.4	3.27
3500	525.2	10.4	1594	13	13	14	1575	411	1163	482.7	4.10
3500	522.2	10.5	1594	13	13	14	1572	409	1161	479.1	4.06
FUERZA IMPACTO 2											
3100	322.8	10.4	2256	9	10	10	2149	481	835	404.7	3.43
3100	321.0	10.5	2256	9	10	10	2145	478	834	401.6	3.41
3500	347.1	10.4	2547	9	10	10	2484	517	965	503.1	4.27
3500	345.1	10.5	2547	9	10	10	2480	514	964	499.3	4.24
CAUDAL MINIMO											
3100	489.1	10.4	1409	13	13	14	1366	383	1009	389.7	3.31
3100	484.4	10.5	1420	13	13	14	1353	380	999	382.4	3.24
3500	489.1	10.4	1809	12	12	13	1865	448	1179	532.1	4.52
3500	484.4	10.5	1820	12	12	13	1847	443	1167	522.0	4.43
CAUDAL VARIABLE											
3100	590.0	10.4	785	16	17	17	815	296	940	280.5	2.38
3100	590.0	10.5	763	17	17	17	761	285	913	262.0	2.22
3500	650.0	10.4	778	17	18	18	784	290	1015	297.1	2.52
3500	650.0	10.5	752	18	18	18	735	280	988	278.8	2.37

CAUDAL CRITICO LECHADA CEMENTO

- 1.....COMPOSICION LECHADA DE CEMENTO
- 2.....DATOS 2 LECTURAS REOMETRO
- 3.....DATOS 6 LECTURAS REOMETRO
- 4.....DATOS 7 LECTURAS REOMETRO
- 5.....DATOS 9 LECTURAS REOMETRO
- 6.....DATOS 11 LECTURAS REOMETRO
- 7.....CALCULAR REOLOGIA-CAUDAL CRITICO
- 8.....RESULTADOS POR IMPRESORA
- 9.....TERMINAR PROGRAMA

SELECCIONAR UNA OPCION ( )

COMPOSICION LECHADA DE CEMENTO

POZO		160D-CORRIENTES	160D-CORRIENTES
TIPO CEMENTO		ANDINO V	ANDINO V
ADITIVO	1	35% SILICA FLOUR	35% SILICA FLOUR
ADITIVO	2	1.5% HALAD-14	1.5% HALAD-14
ADITIVO	3	0.2% D-AIR 1	0.2% D-AIR 1
ADITIVO	4	5% KCl	5% KCl
ADITIVO	5	*	*
ADITIVO	6		

1.....GRABAR REGISTRO ( ).....CONTINUAR

DATOS POZO-REOMETRO FANN 35

TEMP.	CIRCUL.	FONDO	( ° F)	192.00	192.00
DIAM.	BROCA		( PG)	8.50	8.50
DIAM.	EXT. TUBERIA		( PG)	7.00	7.00
PESO	LECHADA		( LPG)	16.40	16.40
LECT.	@	300	RPM	91.00	91.00
LECT.	@	200	RPM	65.00	65.00
LECT.	@	180	RPM	59.00	59.00
LECT.	@	100	RPM	35.00	35.00
LECT.	@	90	RPM	30.00	30.00
LECT.	@	60	RPM	23.00	23.00
LECT.	@	30	RPM	15.00	15.00
LECT.	@	6	RPM	2.00	2.00
LECT.	@	3	RPM	1.00	1.00

1.....GRABAR REGISTRO ( ).....CONTINUAR

PROPIEDADES REOLOGICAS

COEF. CORR.	(LEY PTC)	0.99579
N	(ADIMENS)	0.98039
K	(LB-S <sup>N</sup> /P <sup>2</sup> )	0.00241
COEF. CORR.	(BINGHAM)	0.99706
PV	(CP)	90.56731
YP	(LB/100P <sup>2</sup> )	3.31672

CAUDAL CRITICO MEZCLA

DIAM.	% LEY	DE POTENCIA	%	% PLASTICO	BINGHAM	%
HUECO	NRC	CAUDL	V.CORTE	NRC	CAUDL	V.CORTE
( PG)	( )	( BPM)	( RPM)	( )	( BPM)	( RPM)
8.50	100	0.64	26.7	100	0.54	22.4
8.50	3000	17.99	749.0	2100	11.29	470.0
9.00	100	0.67	15.2	100	0.56	12.6
9.00	3000	18.78	426.0	2100	11.66	264.4
9.50	100	0.70	9.8	100	0.57	8.1
9.50	3000	19.54	275.0	2122	12.15	171.0
10.00	100	0.72	6.8	100	0.59	5.6
10.00	3000	20.27	192.3	2150	12.68	120.3
10.50	100	0.75	5.1	100	0.61	4.1
10.50	3000	20.99	142.1	2183	13.26	89.8
11.00	100	0.77	3.9	100	0.62	3.1
11.00	3000	21.70	109.4	2222	13.88	70.0

PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR

#####  
 CAUDAL CRITICO LECHADA CEMENTO  
 #####

PROGRAMA MARZO 90 REV. DICIEMBRE 1995  
 ANDRÉS SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO-SELVA  
 12-26-1996 14:46:21

COMPOSICION LECHADA DE CEMENTO

#####

POZO	160D-CORRIENTES
TIPO CEMENTO	ANDINO V
ADITIVO 1	35% SILICA FLOUR
ADITIVO 2	1.5% HALAD-14
ADITIVO 3	0.2% D-AIR 1
ADITIVO 4	5% KCl

DATOS POZO-REOMETRO FANN 35

#####

TEMP. CIRCUL. FONDO	(°F)	192.00
DIAM. BROCA	(PG)	8.50
DIAM. EXT. TUBERIA	(PG)	7.00
PESO LECHADA	(LPG)	16.40
LECT. @	300 RPM	91.00
LECT. @	200 RPM	65.00
LECT. @	180 RPM	59.00
LECT. @	100 RPM	35.00
LECT. @	90 RPM	30.00
LECT. @	60 RPM	23.00
LECT. @	30 RPM	15.00
LECT. @	6 RPM	2.00
LECT. @	3 RPM	1.00

#####  
 CAUDAL CRITICO LECHADA CEMENTO  
 #####

PROGRAMA MARZO 90 REV. DICIEMBRE 1995  
 ANDRES SALAS-DPTO. TECNICO PETROLEO-SELVA  
 12-26-1996 14:46:21

PROPIEDADES REOLOGICAS

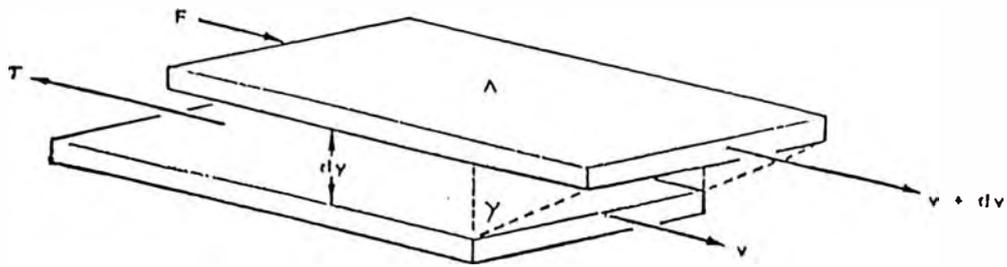
```

#####
COEF. CORR. (LEY PTC) 0.99579
N (ADIMENS) 0.98039
K (LB-S^N/P^2) 0.00241
COEF. CORR. (BINGHAM) 0.99706
PV (CP) 90.56731
YP (LB/100P^2) 3.31672
  
```

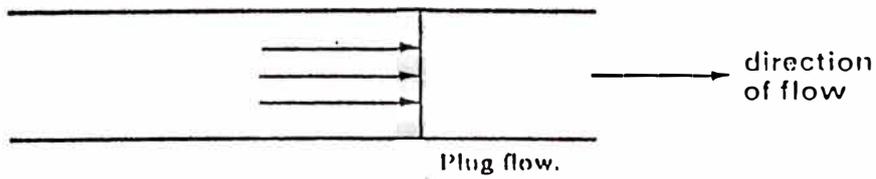
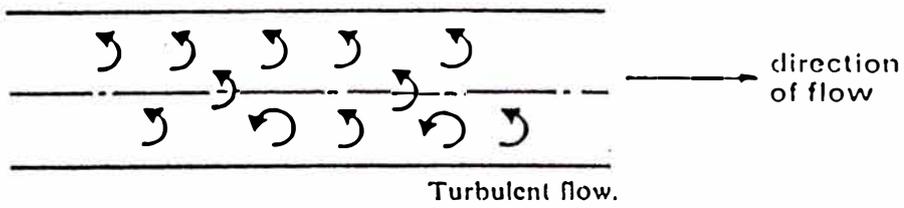
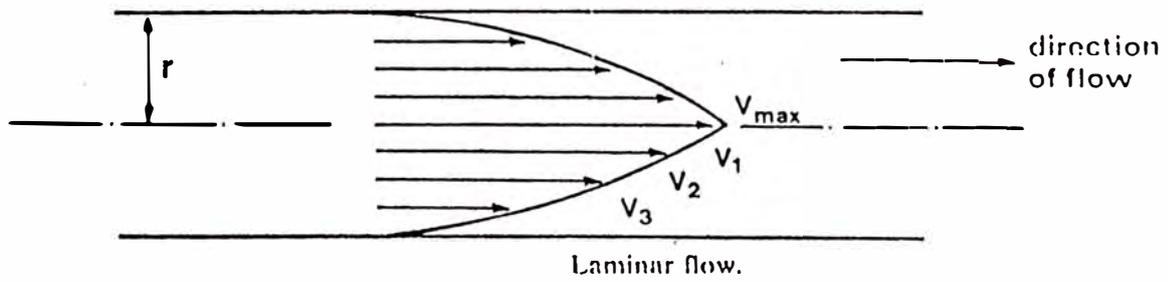
DIAM. HUECO (PG)	%% LEY DE POTENCIA %%			%% PLASTICO BINGHAM %%		
	NRC ( )	CAUDL (BPM)	V.CORTE (RPM)	NRC ( )	CAUDL (BPM)	V.CORTE (RPM)
8.50	100	0.64	26.7	100	0.54	22.4
8.50	3000	17.99	749.0	2100	11.29	470.0
9.00	100	0.67	15.2	100	0.56	12.6
9.00	3000	18.78	426.0	2100	11.66	264.4
9.50	100	0.70	9.8	100	0.57	8.1
9.50	3000	19.54	275.0	2122	12.15	171.0
10.00	100	0.72	6.8	100	0.59	5.6
10.00	3000	20.27	192.3	2150	12.68	120.3
10.50	100	0.75	5.1	100	0.61	4.1
10.50	3000	20.99	142.1	2183	13.26	89.8
11.00	100	0.77	3.9	100	0.62	3.1
11.00	3000	21.70	109.4	2222	13.88	70.0

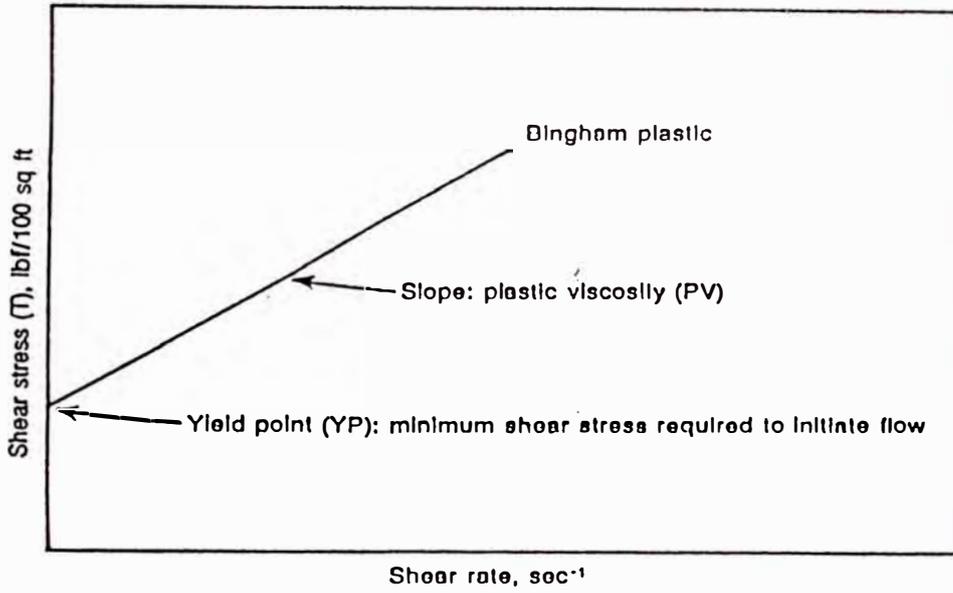
## **REFERENCIAS DE BIBLIOGRAFIA**

1. EXLOG : Theory and Application of Drilling Fluid Hydraulics, 1985
2. Instituto Francés del Petróleo : Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual, 1982
3. Bourgoyne and Chenevert : Applied Drilling Engineering, Society of Petroleum Engineers, 1991
4. Lummus and Azar : Optimization Drilling Fluids-A Practical Field Approach, Penn-Well Publishing Company, 1986
5. Chilingariang: Drilling and Drilling Fluids-1983, Rheology
6. Streeter : Mecánica de Fluidos
7. Kendall and Goins : Design and Operation of Jet-Bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact Force or Jet Velocity, Transactions AIME , 1960
8. Sutko : Drilling Hydraulics-A Study of Chip Removal Force Under a Full-Size Jet Bit, SPE Journal, August 1973
9. Bizanti and Moonesan : Pressure Loss Simulator Improves Nozzles Selection, Petroleum Engineer, July 1990
10. Scott : A New Approach to Drilling Hydraulics, Petroleum Engineer, September 1972
11. Robinson : Optimizing Bit Hydraulics Increases Penetration Rate, World Oil, July 1982
12. Goins and Flak : Bit Hydraulics : A New Solution to Old Problems, World Oil, March 1984
13. Fullerton : Optimum Annular Velocity vs. Hole Size and Mud Weight, Petroleum Engineer Continuous Tables, Citado en Engineering Essentials of Modern Drilling , 1982
14. American Petroleum Institute, API Specification 10-Third Edition, July 1986
15. Mack : Computer Program Helps Determine Cement Rheology, Petroleum Engineer International, April 1987
16. Smith, Cementing-SPE Monograph Volume 4, 1990
17. Haut and Crook : Primary Cementing : The Mud Displacement Process, Society of Petroleum Engineers, 1979
18. Sauer : Mud Displacement During the Cementing Operations: A State of the Art, Society of Petroleum Engineers, 1985
19. Smink-Kundert : How to Obtain a Good Cement Job, World Oil , April 1990

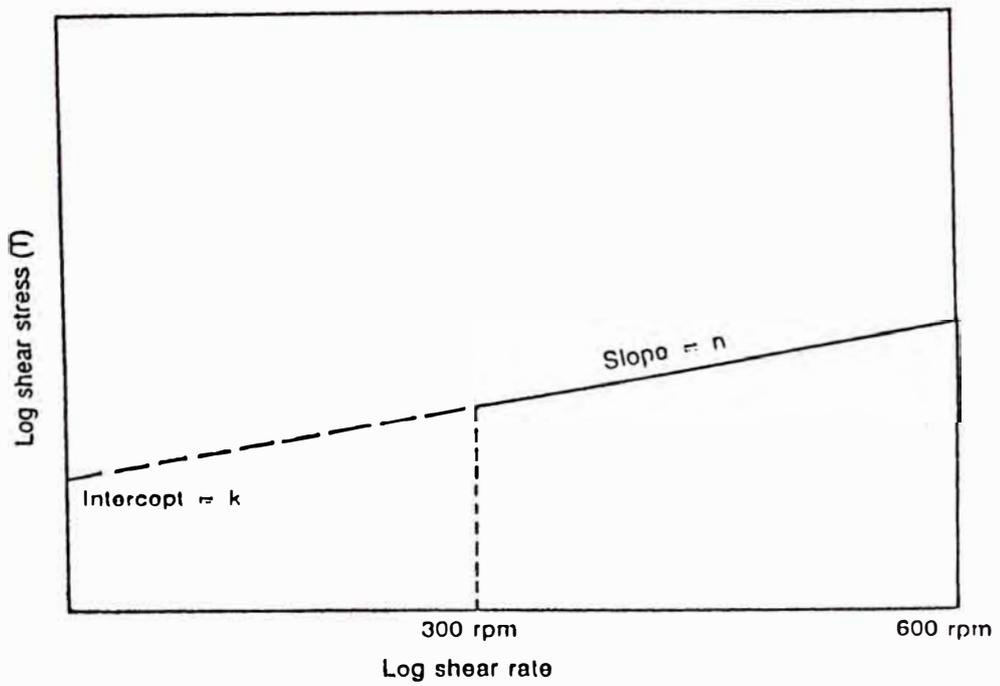


Deformation of a Fluid by Simple Shear

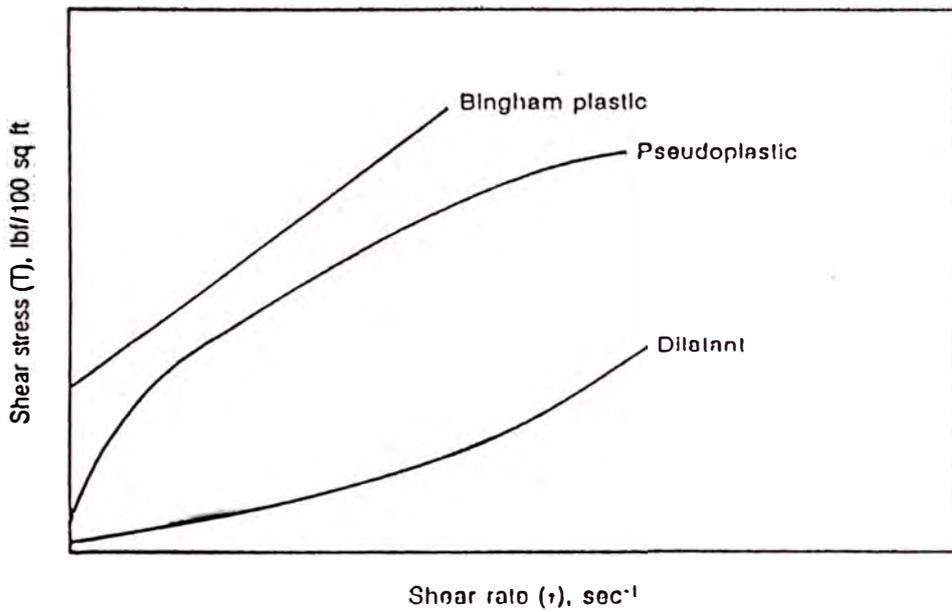




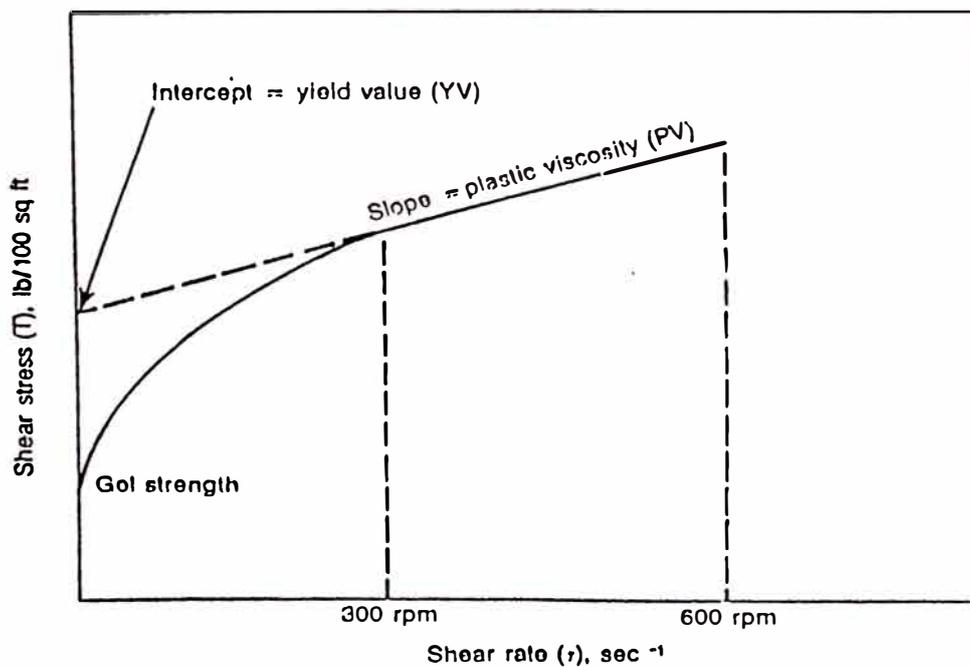
Shear rate/shear stress relationship of Bingham plastic fluids



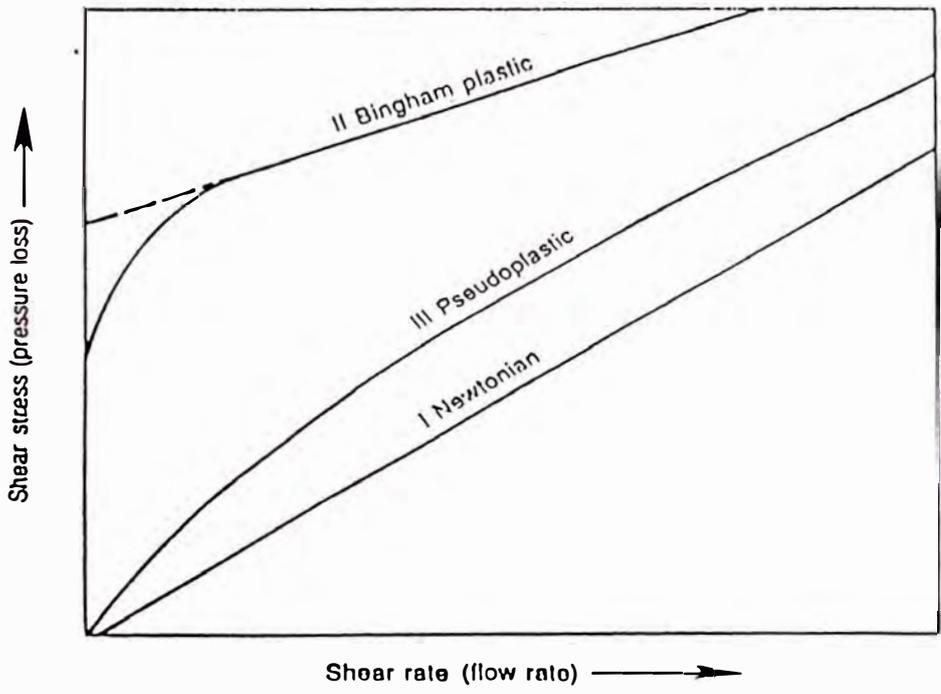
Shear rate/shear stress relationship of Power Law fluids on logarithmic scale



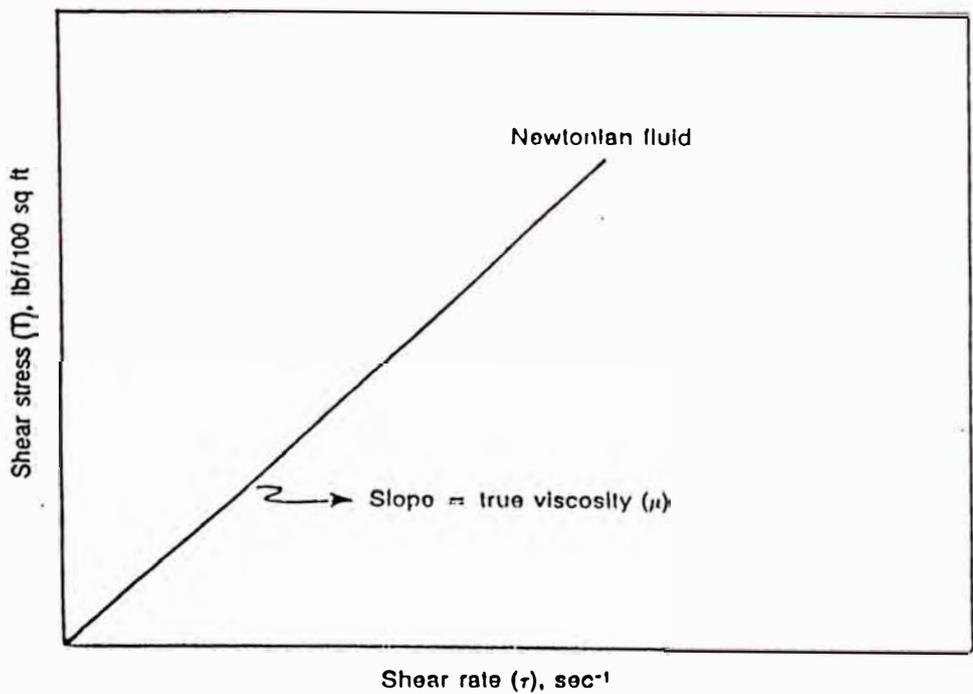
Shear rate/shear stress relationship of time-independent non-Newtonian fluids



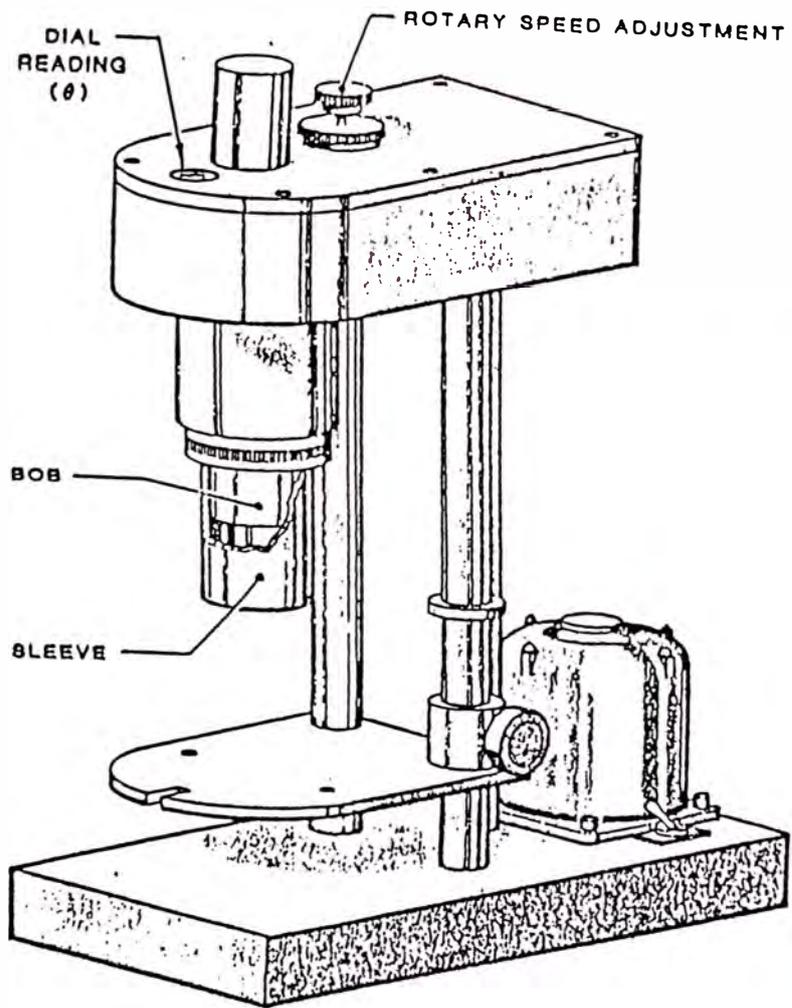
Shear rate/shear stress relationship of a non-Newtonian fluid with thixotropic properties



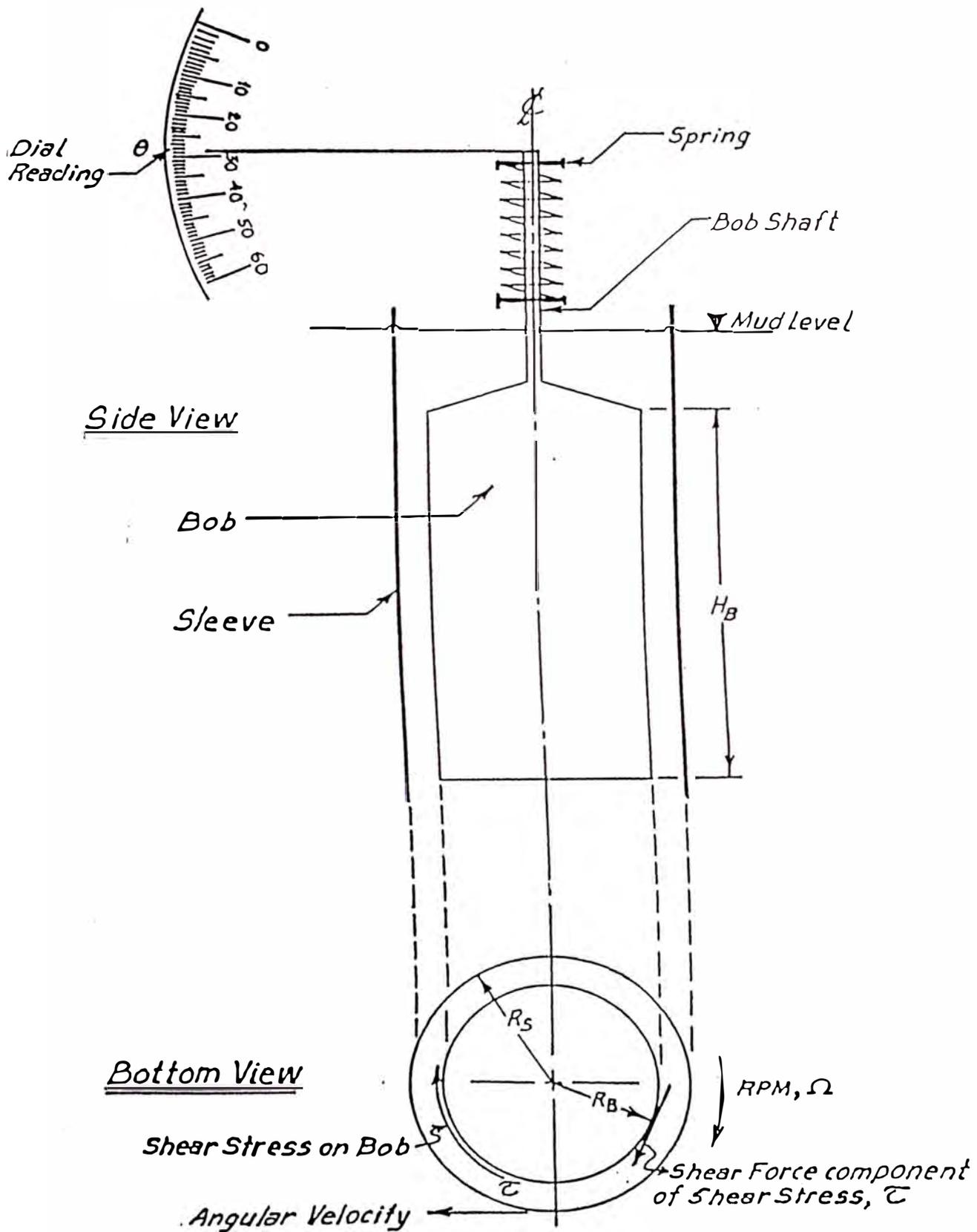
Laminar flow relationship between pressure loss and flow rate for different fluid types



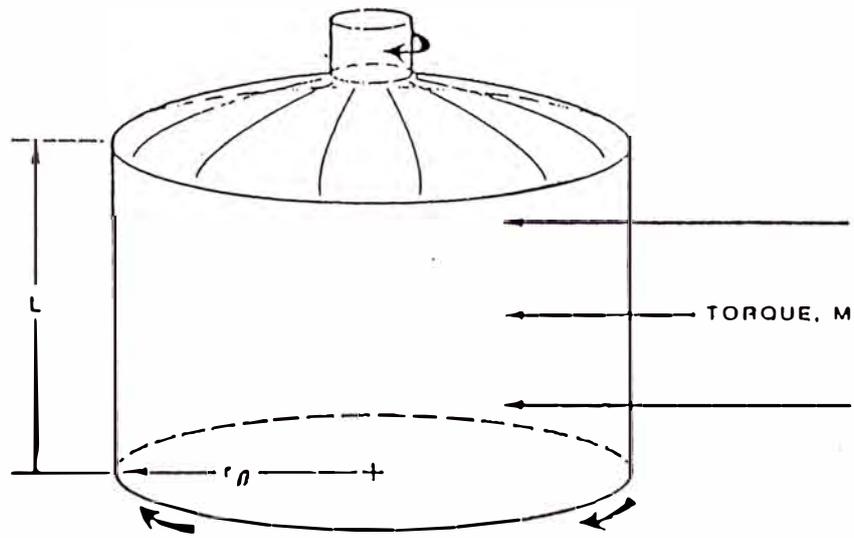
Shear rate/shear stress relationship of Newtonian fluids



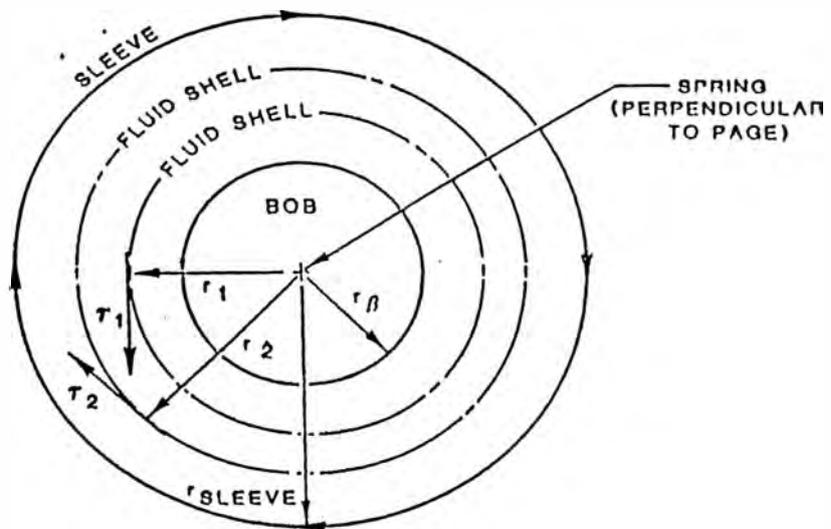
Rotating-Sleeve Viscometer



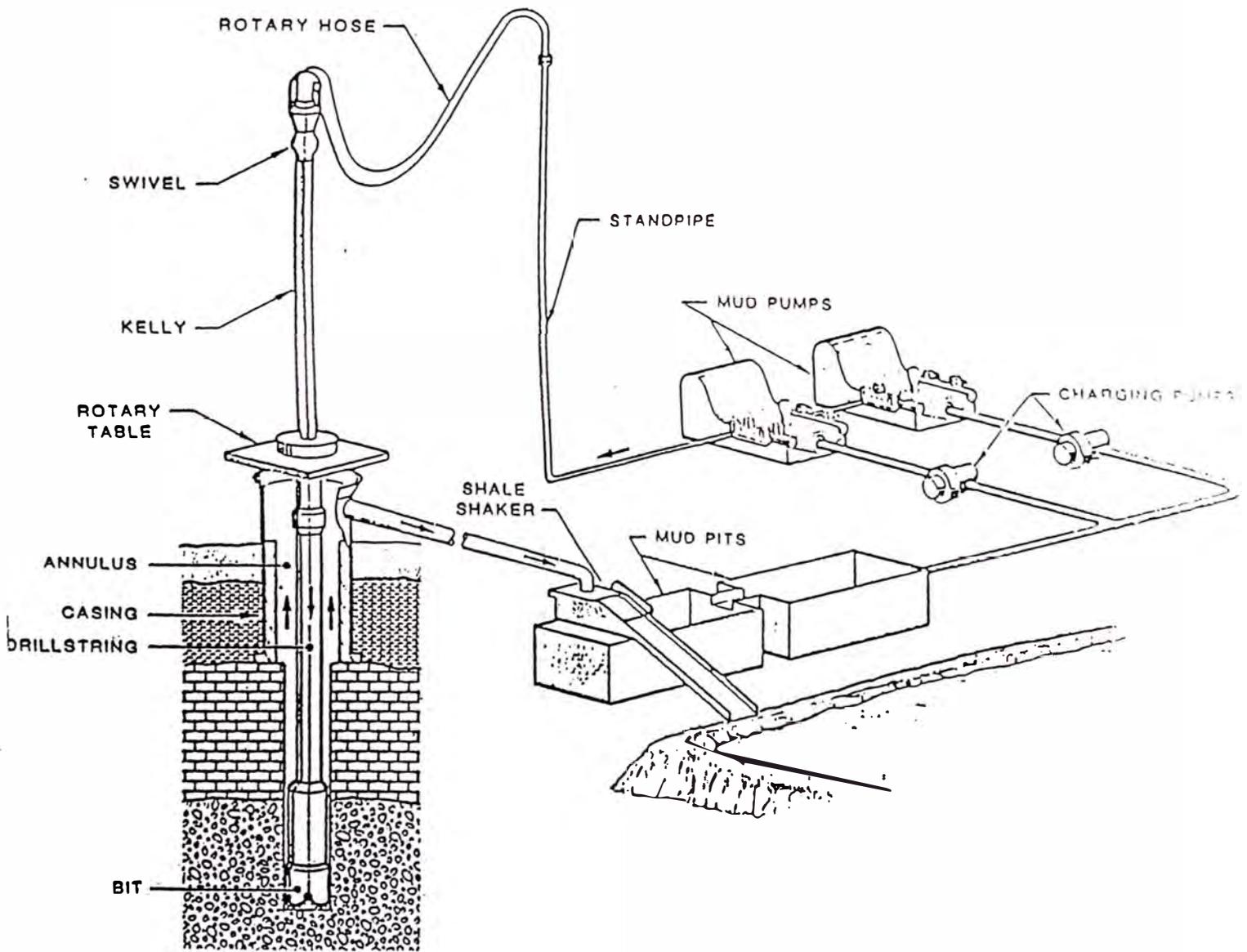
Principle Elements of a Rotational Viscometer



Torque Acting on the Bob

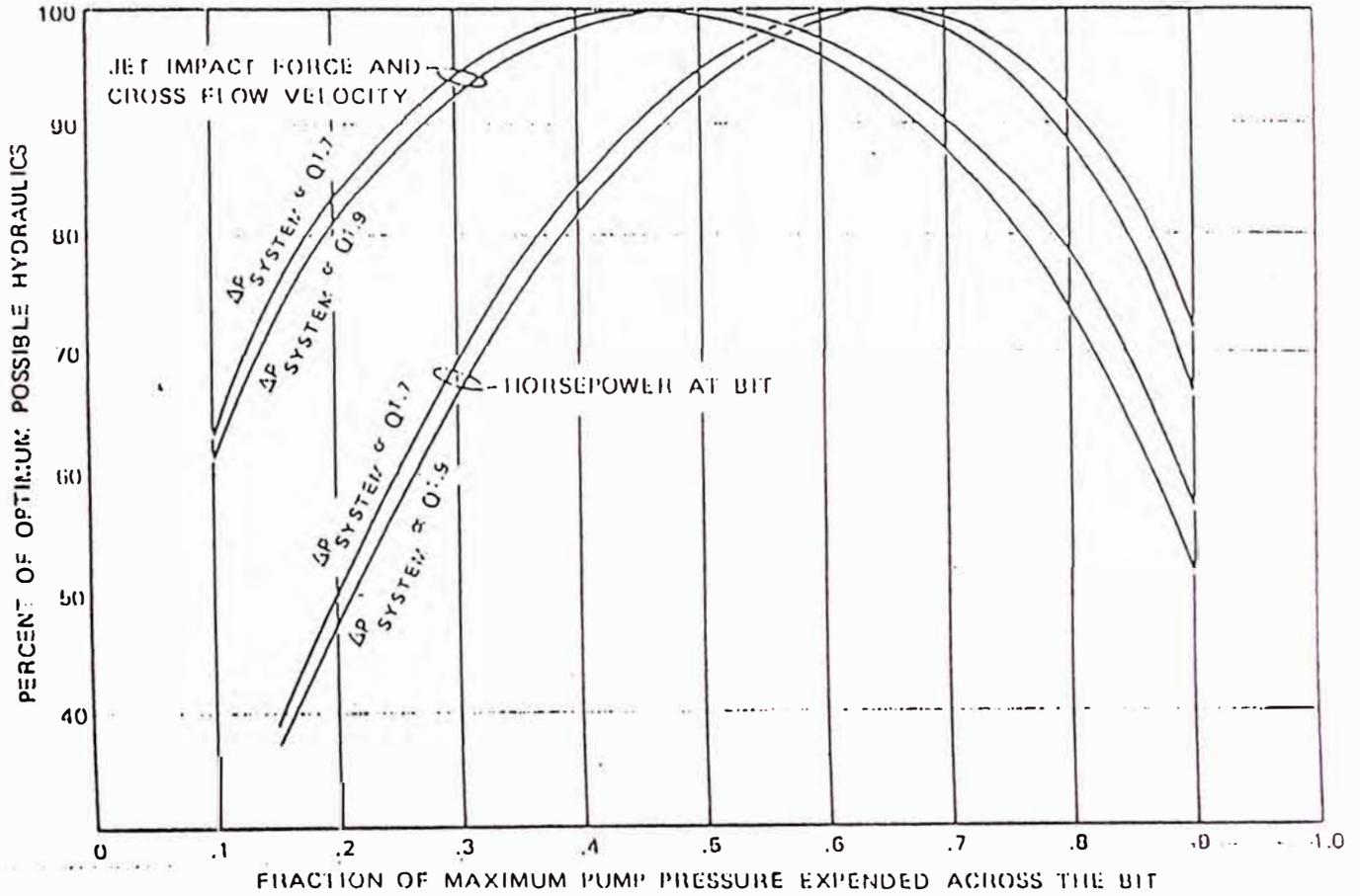


Forces in Equilibrium on Rotating-Sleeve Viscometer

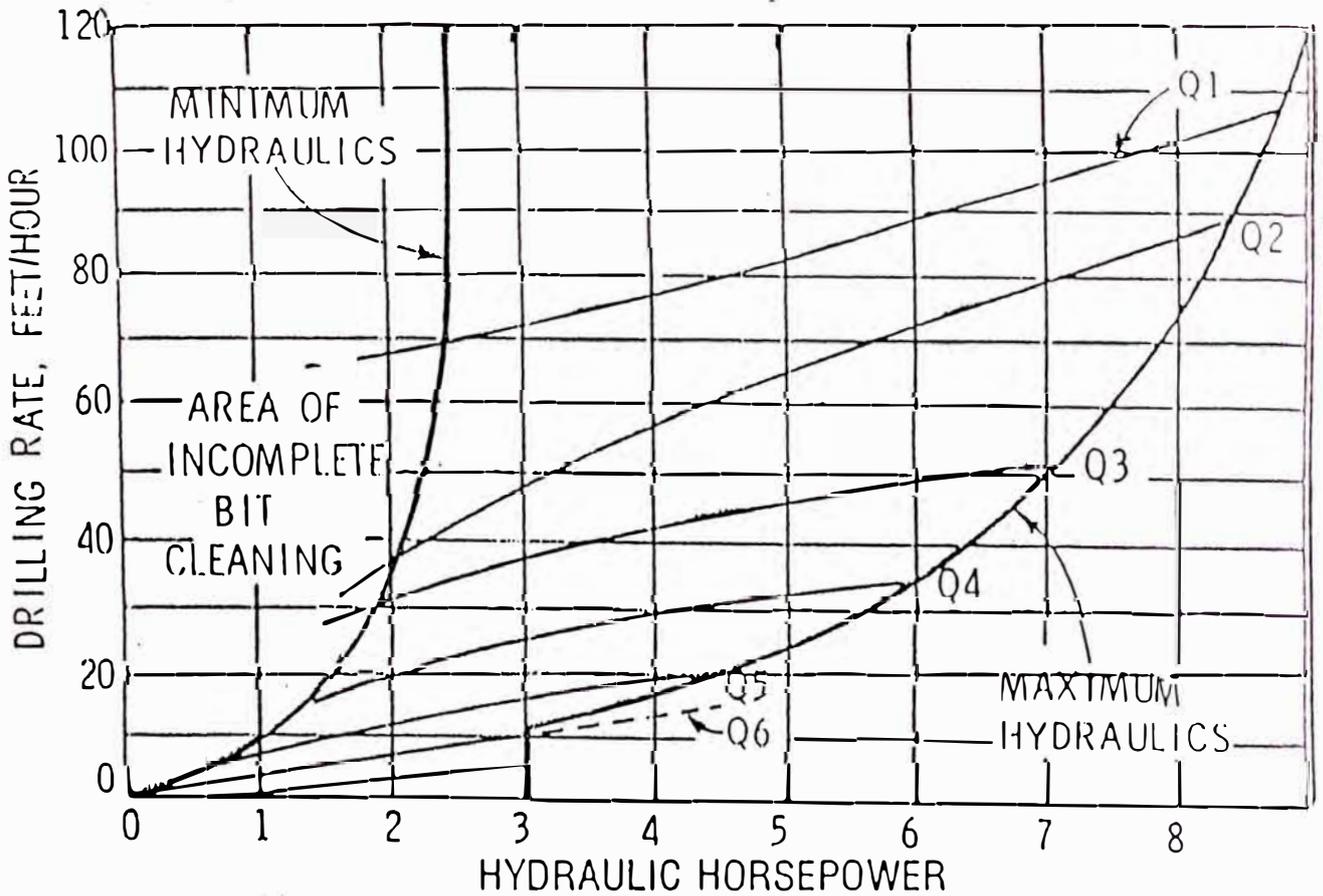


The Rig Circulating System

HYDRAULIC EFFICIENCY FOR CONSTANT PUMP PRESSURE OPERATIONS AS A FUNCTION OF THE FRACTION OF THE SURFACE PUMP PRESSURE EXPENDED ACROSS THE BIT:



(Kundall, Const McLean, Ref. 4, 6, 7)  
Compendium of Atlantic Technology



(Lummus, Ref. 5)

## Bit nozzle selection method (Bingham Plastic Model)

- Step 1.** a) Calculate  $\bar{v}$  for pipe :  

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448 R^2} \quad (B1)$$
 b) Calculate  $\bar{v}$  for annulus :  

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448 (d_2^2 - d_1^2)} \quad (B2)$$
- Step 2.** a) Calculate NII for pipe :  

$$NII = \frac{37,100 \rho^{0.5} d^2}{(\mu_r)^{0.5}} \quad (B3)$$
 b) Calculate NII for annulus :  

$$NII = \frac{24,700 \rho^{0.5} (d_2 - d_1)^2}{(\mu_r)^{0.5}} \quad (B4)$$
- Step 3.** a) Calculate NR for pipe :  

$$NR = \frac{928 \rho \bar{v} d}{\mu_r} \quad (B5)$$
 b) Calculate NR for annulus :  

$$NR = \frac{757 \rho \bar{v} (d_2 - d_1)}{\mu_r} \quad (B6)$$
- Step 4.** a) Solve for NRC from B8 (for pipe) :  

$$16,800 \xi_{rc} = NII (1 - \xi_{rc})^3 \quad (B7)$$

$$NRC = NH/8 \xi_{rc} \left[ (1 - \frac{4}{3} \xi_{rc}) + \frac{1}{3} (\xi_{rc})^3 \right] \quad (B8)$$
 If  $NR < NRC$ , flow is laminar, go to step 5a  
 If  $NR \geq NRC$ , flow is turbulent, go to step 6a  
 b) Solve for NRC from B10 (for annulus) :  

$$22,400 \xi_{rc} = NH (1 - \xi_{rc})^3 \quad (B9)$$

$$NRC = \left[ \sqrt[3]{2/3} NH/8 \xi_{rc} \right] (1 - 3/2 \xi_{rc} + 0.5 \xi_{rc}^3) \quad (B10)$$
 If  $NR < NRC$ , flow is laminar, go to step 5b  
 If  $NR \geq NRC$ , flow is turbulent, go to step 6b
- Step 5.** a) Calculate  $\Delta P$  for pipe :  

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\mu_r \bar{v}}{1,500 d} + \frac{\tau_s}{225 d} \quad (B11)$$
 b) Calculate  $\Delta P$  for annulus :  

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\mu_r \bar{v}}{1,000 (d_2 - d_1)} + \frac{\tau_s}{200 (d_2 - d_1)} \quad (B12)$$
- Step 6.** a) Solve for  $f$  from B13 :  

$$1/f = 4 \log (NR \cdot f^{0.25}) - 0.395 \quad (B13)$$
 Then, calculate  $\Delta P$  for pipe :  

$$\Delta P = \frac{f \rho \bar{v}^2}{25.8 d} \quad (B14)$$
 b) Solve for  $f$  from B13  
 Then, calculate  $\Delta P$  for annulus :  

$$\Delta P = \frac{f \rho \bar{v}^2}{21.1 (d_2 - d_1)} \quad (B15)$$
- Step 7.** Calculate  $\Delta P_b$  :  

$$\Delta P_b = \Delta P_1 + \Delta P_{fr} + \Delta P_a + \Delta P_{ls} + \Delta P_{tr} \quad (B16)$$
- Step 8.** Calculate  $q_{max}$ ,  $q_{max} (\Delta P_b)_{opt}$ ,  $(\Delta P_b)_{opt}$  :  

$$q_{max} = \frac{1,714 P_{shp} E}{\mu_r} \quad (B17)$$

$$q_{max} = 2,448 (1/2 \cdot OD)^2 (v/60) \quad (B18)$$
 For maximum bit hydraulic hp  $\rightarrow (\Delta P_b)_{opt} = (1/4 + m) P_{shp} \quad (B19)$   
 For maximum jet impact force  $\rightarrow (\Delta P_b)_{opt} = (2/2 + m) P_{shp} \quad (B20)$
- Step 9.** Numerically  $(\Delta P_b)_{opt}$  and  $q_{max}$  are obtained from geometry representing the optimum hydraulic path.  
 Then, calculate  $(\Delta P_b)_{opt}$  :  

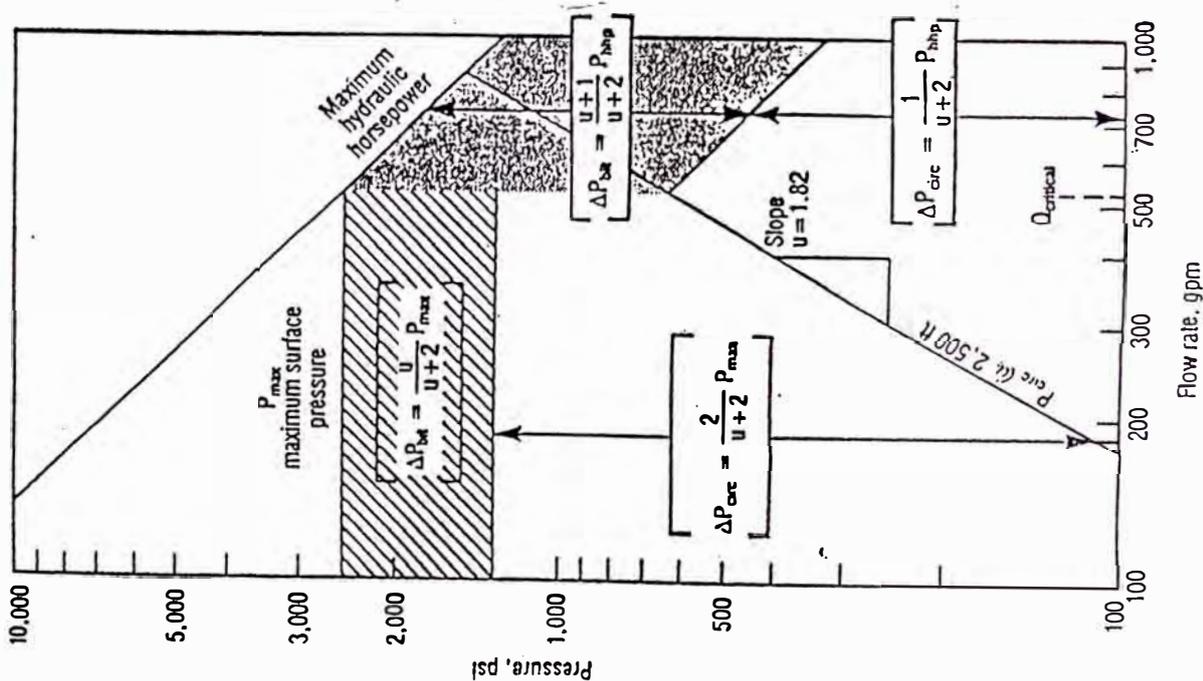
$$(\Delta P_b)_{opt} = P_{shp} - (\Delta P_b)_{tr} \quad (B21)$$
- Step 10.** Calculate  $(HHP)_{opt}$  :  

$$(HHP)_{opt} = \frac{(\Delta P_b)_{opt} \cdot q_{max}}{1,714} \quad (B22)$$
- Step 11.** Calculate  $(JF)_{opt}$  :  

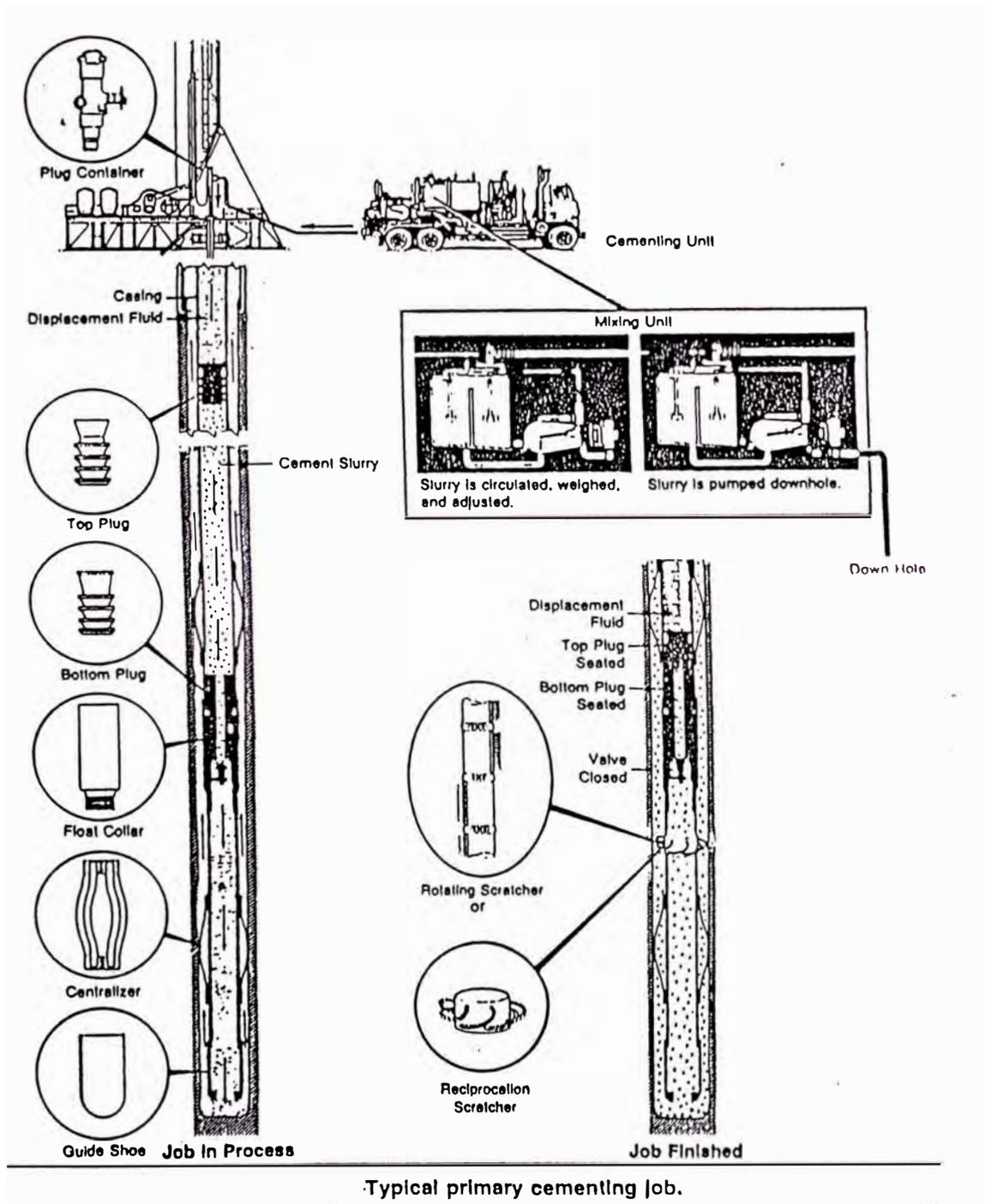
$$(JF)_{opt} = 0.01823 C_d q_{max} / \rho (\Delta P_b)_{opt} \quad (B23)$$
- Step 12.** Calculate optimum total nozzle area :  

$$(A_n)_{opt} = \sqrt{\frac{8.311 \times 10^6 \rho (q_{max})^2}{(C_d)^2 (\Delta P_b)_{opt}}} \quad (B24)$$
- Step 13.** Calculate optimum nozzle diameter  

$$D = 64 \sqrt{\frac{(A_n)_{opt}}{3\pi}} \quad (B25)$$



PEI  
Pressure drop through the bit for maximum hydraulic impact.



Typical primary cementing job.



**PHYSICAL REQUIREMENTS FOR API CEMENTS<sup>7</sup>**  
(Parenthetical values are in metric units)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Well Cement Class					A	B	C	D	E	F	G	H	J*
Water, per cent by weight of well cement					46	46	66	38	38	38	44	38	
Soundness (autoclave expansion), maximum, per cent (Section 4)					0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	
Fineness* (specific surface), minimum, m <sup>2</sup> /kg					160	160	220						
Free water content, maximum, mL (Section 6)											8.6**	8.6**	

Compressive Strength Test, Eight Hour Curing Time (Section 7)	Schedule Number, Table 7.1	Curing Temp, F (°C)	Curing Pressure, psi (kPa)	Minimum Compressive Strength, psi (MPa)									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		100 (38)	Atmos.	260 (1.7)	200 (1.4)	300 (2.1)					300 (2.1)	300 (2.1)	
		140 (60)	Atmos.								1500 (10.3)	1500 (10.3)	
	6S	230 (110)	3000 (20700)					600 (3.6)					
	8S	290 (143)	3000 (20700)						600 (3.6)				
	9S	320 (160)	3000 (20700)							600 (3.6)			

Compressive Strength Test, Twelve Hour Curing Time (Section 7)	8S	200 (143)	3000 (20700)										600 (3.6)
--	----	-----------	--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----------

Compressive Strength Test, Twenty-four Hour Curing Time (Section 7)	Schedule Number, Table 7.1	Curing Temp, F (°C)	Curing Pressure, psi (kPa)	Minimum Compressive Strength, psi (MPa)									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		100 (38)	Atmos.	1800 (12.4)	1600 (10.3)	2000 (13.8)							
	4S	170 (77)	3000 (20700)					1000 (6.9)	1000 (6.9)				
	6S	230 (110)	3000 (20700)						2000 (13.8)		1000 (6.9)		
	8S	290 (143)	3000 (20700)							2000 (13.8)			
	9S	320 (160)	3000 (20700)								1000 (6.9)		
	10S	350 (177)	3000 (20700)										1000 (6.9)†

Pressure Temperature Thickening Time Test (Section 8)	Specification Test Schedule Number, Table 8.2	Maximum Consistency 15-30 Minute Stirring Period, Bct	Minimum Thickening Time, minutes***										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1	30	90	90	90	90							
	4	30	90	90	90	90							
	6	30											
	6	80									90	90	
	6	30									120 max.†	120 max.†	
	6	30						100	100	100			180
	8	30							154				
	9	30								190			180

\*Water as recommended by the manufacturer.  
 †Determined by Wagner turbidimeter apparatus described in ASTM C 115: *Fineness of Portland Cement by the Turbidimeter*.  
 \*\*Based on 260 mL volume, percentage equivalent of 8.6 mL is 3.4%.  
 ‡Compressive strength after 7 days shall be no less than the 24-hour compressive strength on Schedule 10S.  
 †Barden units of slurry consistency (Bct).  
 \*\*\*Thickening time requirements are based on 75 percentile values of the total cementing times observed in the casing survey, plus a 25 per cent safety factor.  
 †Maximum thickening time requirement for Schedule 6 is 120 minutes.

**PHYSICAL PROPERTIES OF VARIOUS TYPES OF CEMENT <sup>11</sup>**

**Properties of API Classes of Cement**

	<u>Class A</u>	<u>Class C</u>	<u>Classes G and H</u>	<u>Classes D and E</u>
Specific gravity (average)	3.14	3.14	3.15	3.16
Surface area (range), cm <sup>2</sup> /g	1,500 to 1,900	2,000 to 2,800	1,400 to 1,700	1,200 to 1,600
Weight per sack, lbm	94	94	94	94
Bulk volume, cu ft/sack	1	1	1	1
Absolute volume, gal/sack	3.6	3.6	3.58	3.57

**Properties of Neat Slurries**

	<u>Portland</u>	<u>High Early Strength</u>	<u>API Class G</u>	<u>API Class H</u>	<u>Retarded</u>
Water, gal/sack (API)	5.19	6.32	4.97	4.29	4.29
Slurry weight, lbm/gal	15.6	14.8	15.8	16.5	16.5
Slurry volume, cu ft/sack	1.18	1.33	1.14	1.05	1.05

Temperature (°F)	Pressure (psi)	Typical Compressive Strength (psi) at 24 Hours				
		Portland	High Early Strength	API Class G	API Class H	Retarded
60	0	615	780	440	325	*
80	0	1,470	1,870	1,185	1,065	*
95	800	2,085	2,015	2,540	2,110	*
110	1,600	2,925	2,705	2,915	2,525	*
140	3,000	5,050	3,560	4,200	3,160	3,045
170	3,000	5,920	3,710	4,830	4,485	4,150
200	3,000	*	*	5,110	4,575	4,775

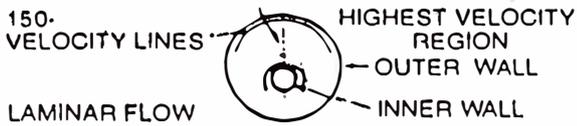
Temperature (°F)	Pressure (psi)	Typical Compressive Strength (psi) at 72 hours				
		Portland	High Early Strength	API Class G	API Class H	Retarded
60	0	2,870	2,535	—	—	*
80	0	4,130	3,935	—	—	*
95	800	4,670	4,105	—	—	*
110	1,600	5,840	4,780	—	—	*
140	3,000	6,550	4,960	—	7,125	4,000
170	3,000	6,210	4,460	5,685	7,310	5,425
200	3,000	*	*	7,360	9,900	5,920

Depth (ft)	Temperature (°F)		High-Pressure Thickenin Time (hours:minutes)				
	Static	Circulating	Portland	High Early Strength	API Class G	API Class H	Retarded
2,000	110	91	4:00 +	4:00 +	3:00 +	3:57	*
4,000	140	103*	3:26	3:10	2:30	3:20	4:00 +
6,000	170	113	2:25	2:06	2:10	1:57	4:00 +
8,000	200	125	1:40*	1:37*	1:44	1:40	4:00 +

\*Not generally recommended at this temperature.

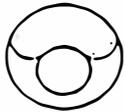
**SUMMARY OF OILWELL CEMENTING ADDITIVES**

Type of Additive	Use	Chemical Composition	Benefit	Type of Cement
<b>Accelerators</b>	Reducing WOC time Setting surface pipe Setting cement plugs Combating lost circulation	Calcium chloride Sodium chloride Gypsum Sodium silicate Dispersants Seawater	Accelerated setting High early strength	All API classes Pozzolans Dical systems
<b>Retarders</b>	Increasing thickening time for placement Reducing slurry viscosity	Lignosulfonates Organic acids CMHEC Modified lignosulfonates	Increased pumping time Better flow properties	API Classes D, E, G, and H Pozzolans Dical systems
<b>Weight-reducing additives</b>	Reducing weight Combating lost circulation	Bentonite/atlapulgitte Gilsonite Diatomaceous earth Perlite Pozzolans Microspheres (glass spheres) Nitrogen (foam cement)	Lighter weight Economy Better fill-up Lower density	All API classes Pozzolans Dical systems
<b>Heavyweight additives</b>	Combating high pressure Increasing slurry weight	Hematite Ilmenite Barite Sand Dispersants	Higher density	API Classes D, E, G, and H
<b>Additives for controlling lost circulation</b>	Bridging Increasing fill-up Combating lost circulation Fast-setting systems	Gilsonite Walnut hulls Cellophane flakes Gypsum cement Bentonite/diesel oil Nylon fibers Thixotropic additives	Bridged fractures Lighter fluid columns Squeezed fractured zones Treating lost circulation	All API classes Pozzolans Dical systems
<b>Filtration-control additives</b>	Squeeze cementing Setting long liners Cementing in water-sensitive formations	Polymers Dispersants CMHEC Latex	Reduced dehydration Lower volume of cement Better fill-up	All API classes Pozzolans Dical systems
<b>Dispersants</b>	Reducing hydraulic horsepower Densifying cement slurries for plugging Improving flow properties	Organic acids Polymers Sodium chloride Lignosulfonates	Thinner slurries Decreased fluid loss Better mud removal Better placement	All API classes Pozzolans Dical systems
<b>Special cements or additives</b>				
<b>Salt</b>	Primary cementing	Sodium chloride	Better bonding to salt, shales, sands	All API classes
<b>Silica flour</b>	High-temperature cementing	Silicon dioxide	Stabilized strength Lower permeability	All API classes
<b>Mud Kill</b>	Neutralizing mud-treating chemicals	Paraformaldehyde	Better bonding Greater strength	API Classes A, B, C, G, and H
<b>Radioactive tracers</b>	Tracing flow patterns Locating leaks	Sc 46	—	All API classes
<b>Pozzolan lime</b>	High-temperature cementing	Silica-lime reactions	Lighter weight Economy	—
<b>Silica lime</b>	High-temperature cementing	Silica-lime reactions	Lighter weight	—
<b>Gypsum cement</b>	Dealing with special conditions	Calcium sulfate hemihydrate	Higher strength Faster setting	—
<b>Hydromite</b>	Dealing with special conditions	Gypsum with resin	Higher strength Faster setting	—
<b>Latex cement</b>	Dealing with special conditions	Liquid or powdered latex	Better bonding Controlled filtration	API Classes A, B, G, and H
<b>Thixotropic additives</b>	Covering lost-circulation zones Preventing gas migration	Organic additives Inorganic additives	Fast setting and/or gelation Less fall-back Reduces lost circulation	All API classes
<b>Mud spacers</b>	Minimizing contamination	Variable	Uniform cement distribution	All cementing systems
<b>Mud flushes</b>	Aiding in drilling mud displacement Separating incompatible fluids	Variable	Better mud removal Reduced lost circulation	

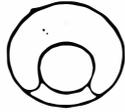


LAMINAR FLOW

**NON NEWTONIAN  
DRILLING MUD SYSTEMS**



LOW RATE



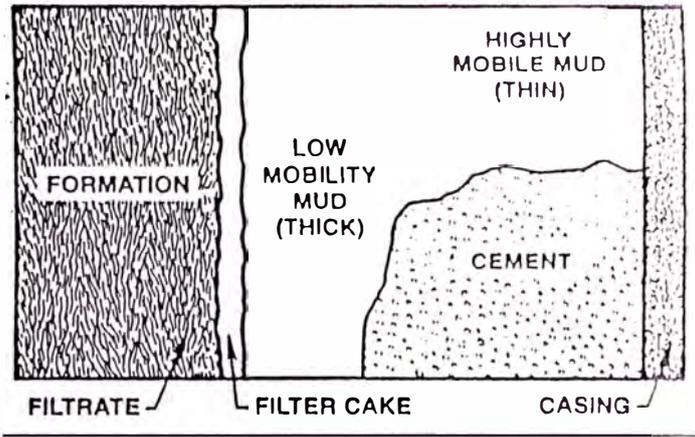
MODERATE RATE



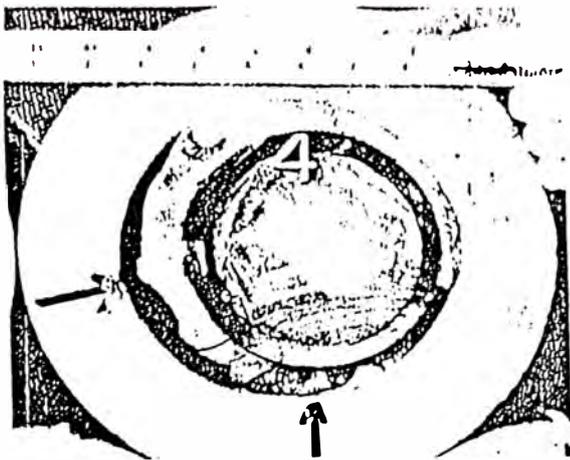
HIGH RATE

□ PLUG □ STATIONARY FLUID □ SHEAR REGION

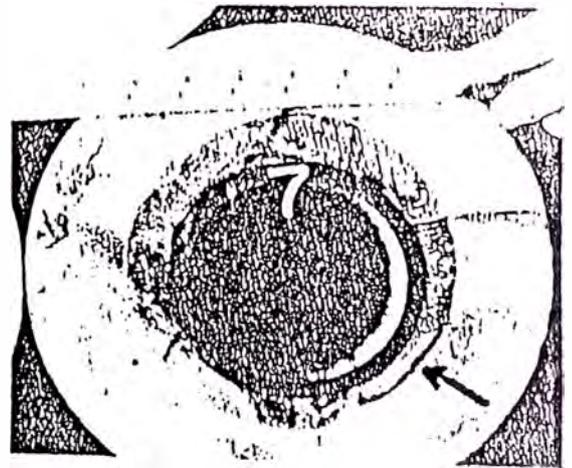
Flow of Newtonian and non-Newtonian systems in an eccentric annulus.<sup>17</sup>



Mud mobility concept.

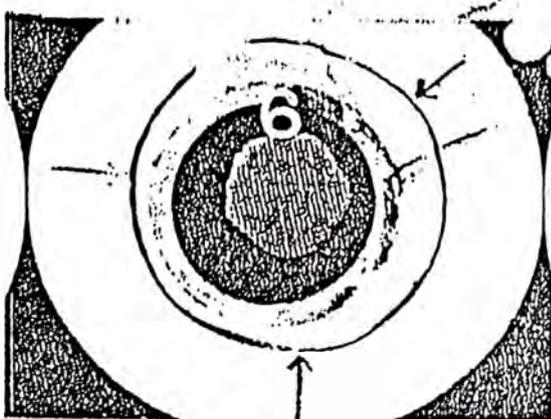


Plug Flow  
Rate: 1 BPM  
Efficiency: 48%

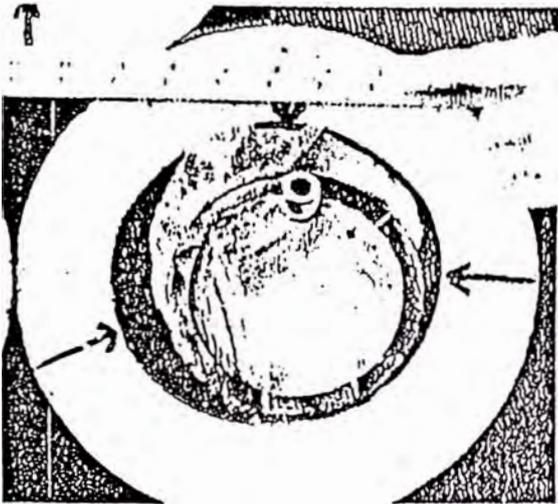


Turbulent Flow  
Rate: 7 BPM  
Efficiency: 98%

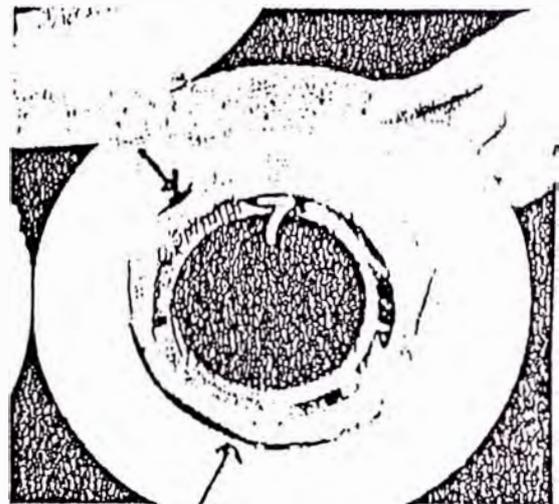
Mud removal vs. flow rate.



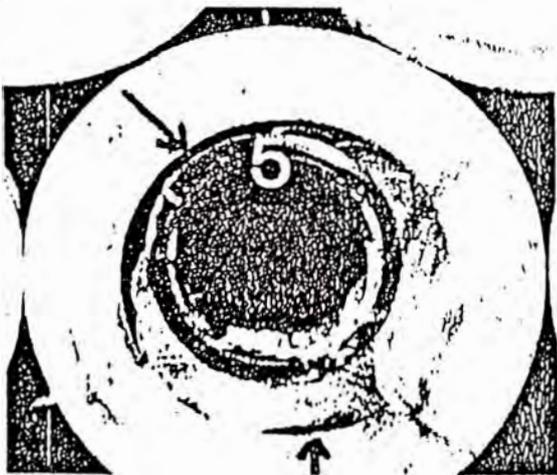
Laminar Flow  
Rate: 4 BPM  
Efficiency: 75%



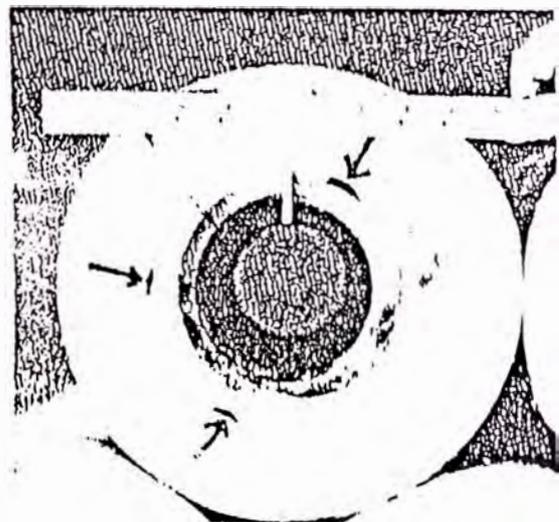
Standoff: 17%  
Efficiency: 45%



Standoff: 60%  
Efficiency: 88%

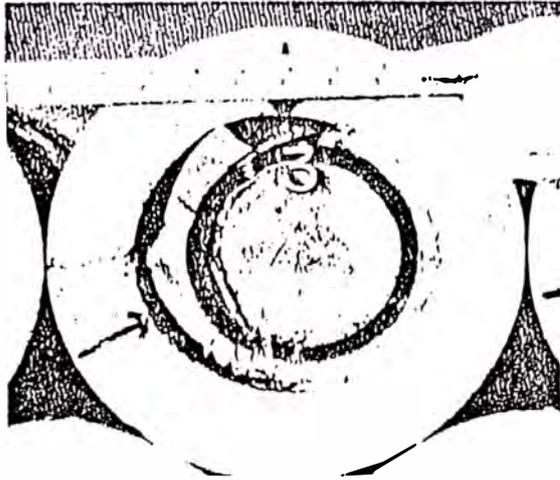


Standoff: 35%  
Efficiency: 77%



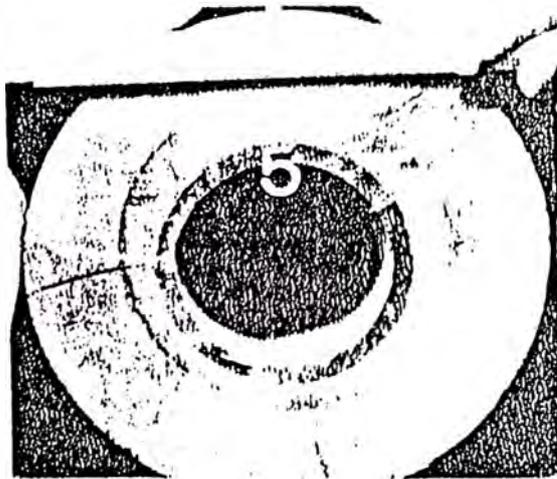
Standoff: 72%  
Efficiency: 97%

Mud removal vs. centralization.



No Movement  
Efficiency: 65%

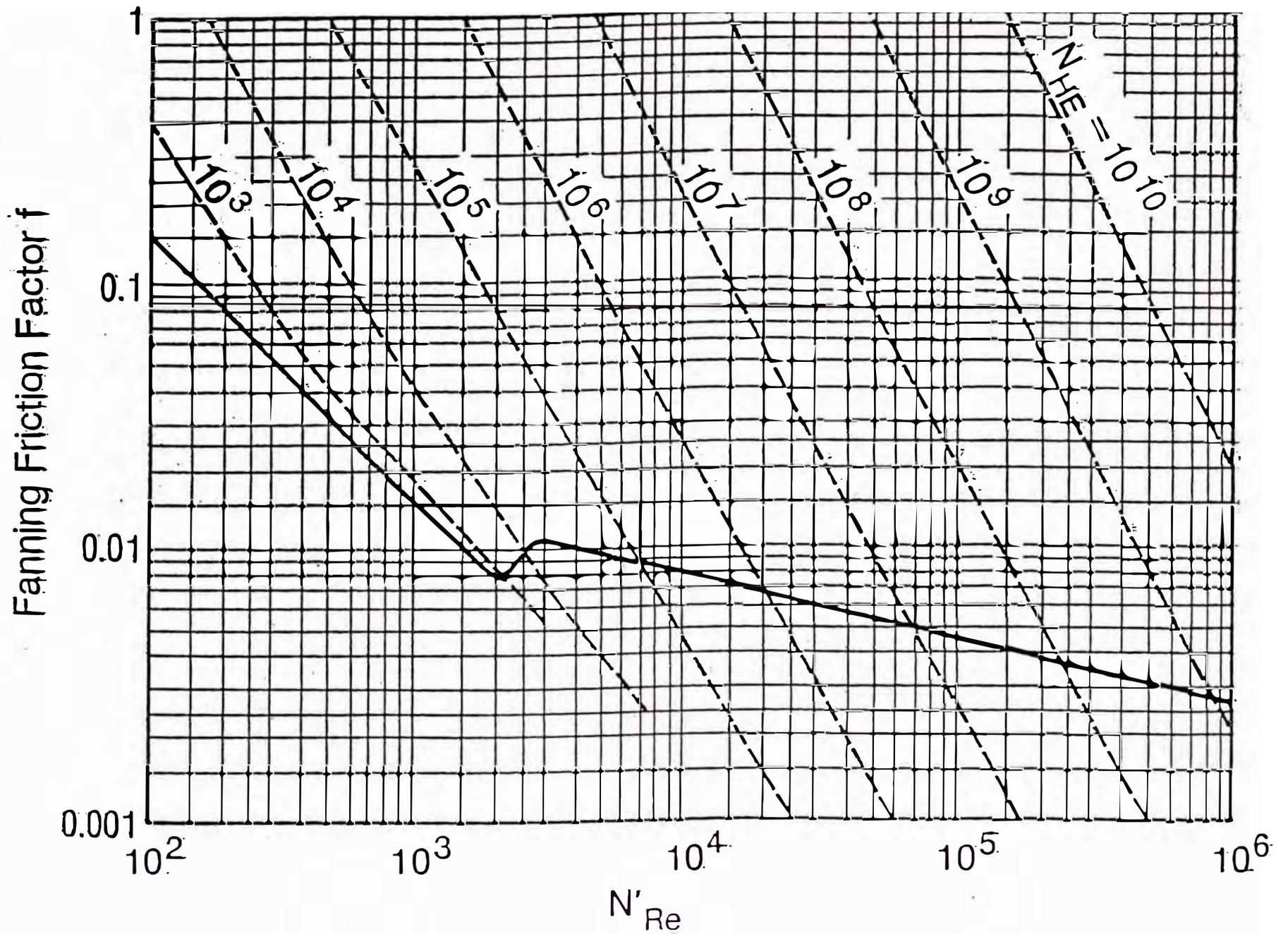
---



Rotation  
Efficiency: 99%

---

Mud removal vs. pipe rotation.



Friction Factor – Reynolds Number Chart for Bingham Plastic Flow in Tubes  
(after Hedstrom)

Trompetaron, 18 de mayo de 1998

A : Superintendencia Perforación  
v Servicio de Pozos Selva

Asunto : Programa para cementar lina de 7" :  
pozo 160D-Corrientes

De : Dpto. Técnico de Petróleo Selva

Sírvanse encontrar adjunto el programa de trabajo para ce-  
mentar la tubería de revestimiento (lina) de 7" en el pozo  
160D-Corrientes.

La tubería de 7" debe ser del lote sometido a trabajos de  
remoción del barniz de fábrica mediante sand-blasting, a fin  
de favorecer la adherencia del cemento a la tubería.

COPIA ORIGINAL  
FIRMADO POR  
ANDRÉS SALAS-CORREA  
FICHA 32859

---

Andrés Salas Correa  
Jefe Grupo  
Perforación-Completación

A. Salas

cc.: Gerencia Campo Selva  
Dpto. Técnico de Petróleo Selva-Iquitos  
Supervisor Perforación Equipo 4  
Archivo pozo 160D-Corrientes

Trompeteros, 18 de mayo de 1996

**A**            ***Superintendencia Perforación  
y Servicio de Pozos Selva***

**Asunto**    **Programa para cementar lina de 7" :  
pozo 160D-Corrientes**

**De**            ***Dpto. Técnico de Petróleo Selva***

Sírvanse encontrar adjunto el programa de trabajo para cementar la tubería de revestimiento (lina) de 7" en el pozo 160D-Corrientes.

La tubería de 7" debe ser del lote sometido a trabajos de remoción del barniz de fábrica mediante sand-blasting, a fin de favorecer la adherencia del cemento a la tubería.

**Andrés Salas Correa**

***Jefe Grupo***

***Perforación-Completación***

A. Salas

cc.:    Gerencia Campo Selva  
      **Dpto. Técnico de Petróleo Selva-Iquitos**  
      Supervisor Perforación Equipo 4  
      Archivo pozo 160D-Corrientes

## PROGRAMA PARA CEMENTAR LAINA DE 7"

### POZO 160D-CORRIENTES

1. Perforar con broca de **8-1/2" PDC M70** hasta **3134 m** ó hasta la profundidad final que determine Geología (**por lo menos 80 m debajo de la base de la arena prospectiva inferior**).

Bombear **50 bl** de lodo con alta resistencia de gel (**gel a 10 minutos=100 lbf/100 p<sup>2</sup>**) para remover los recortes perforados del hueco.

2. Circular durante **4 horas** a igual caudal empleado en la perforación (**10.5 bpm-3x75 spm**) y acondicionar el lodo a las siguientes propiedades

peso	<b>10.0</b>	lb/gl
viscosidad plástica	<b>18-20</b>	cp
punto cedente	<b>20-22</b>	lbf/100 p <sup>2</sup>
resistencias de gel	<b>4/20/40</b>	lbf/100 p <sup>2</sup>
filtrado API	<b>4-5</b>	cm <sup>3</sup> /30 min
caudal crítico (hueco 8.5"-DC 6.5")	<b>11.8-12.6 bpm</b>	

3. Realizar viaje de cañería hasta el zapato de los forros de 9-5/8". Circular en el fondo durante **4 horas** al mismo caudal de flujo de **10.5 bpm** (3x75 spm), sacar cañería.

Si se tiene arrastre anormal ó puentes, efectuar viajes de cañería para repasar el hueco y **de ser necesario aumentar el peso del lodo en 0.2 lb/gl** (o el valor correspondiente para la densidad equivalente de circulación) hasta controlar la estabilidad del hueco; sacar cañería.

4. Tomar registros eléctricos según programa de Geología.
5. Bajar cañería con broca tricónica de 8-1/2" (3 boquillas de 10/32") y el mismo conjunto de estabilizadores. Bombear **50 bl** de lodo con alta resistencia de gel (**gel a 10 minutos=100 lbf/100 p<sup>2</sup>**) para remover recortes perforados.
6. Circular en el fondo **4 horas** a **10.5 bpm** (3x75 spm) y acondicionar el lodo a las si-

guientes propiedades :

peso	<b>10.0</b>	lb/gl
viscosidad plástica	<b>18-20</b>	cp
punto cedente	<b>18-20</b>	lbf/100 p <sup>2</sup>
resistencias de gel	<b>4/15/30</b>	lbf/100 p <sup>2</sup>
filtrado API	<b>4-5</b>	cm <sup>3</sup> /30 min
caudal crítico (hueco 8.5"-DC 6.5")	: <b>11.3-12.1</b> bpm	

7. Realizar viaje de cañería hasta el zapato de la tubería de 9-5/8"; circular en el fondo al mismo caudal de flujo anterior (**10.5 bpm**) durante **4 horas**, sacar cañería.

Si se tiene arrastre anormal ó puentes, efectuar viajes de cañería para repasar el hueco y **de ser necesario aumentar el peso del lodo en 0.2 lb/gl** (o el valor correspondiente para la densidad equivalente de circulación) hasta controlar la estabilidad del hueco; sacar cañería.

8. Empezar a bajar +/- **58 tubos nuevos** de tubería de revestimiento de **7"-N80-29 lb/p-8 rd**. Los tubos no deben tener recubrimiento de barniz de fábrica, removido mediante sand-blasting o con esmeril portátil.

Emplear los siguientes equipos y accesorios :

- Zapato brown, float collar, catcher sub, landing collar
- **20 rascadores** tipo cable : uno cada tubo, desde el tubo 3 hasta el tubo 22.
- **Un tubo corto** para correlacionar las profundidades de punzonamiento de las arenas Cetico-Pona.
- La cantidad, tipo y ubicación definitiva de centralizadores se determinará de acuerdo al calibre del pozo de los registros eléctricos.  
Se emplearían **28 centralizadores para 80% de centralización** según relación siguiente :
- **18 centralizadores S-4 de 7"x8-1/2"** (diámetro máximo 9") desde el primer tubo hasta el tubo encima del tope de Vivian.
- **7 centralizadores S-4 de 7"x9-7/8"** (diámetro máximo 10.4") en Yahuarango
- **4 unidades de turbolizador de 7"x8-1/2"** (diámetro máximo 8-1/4") en Yahuarango y Pozo Basal

- **3 centralizadores S-4 de 7"x9-7/8"** entre los forros de 9-5/8" y 7".
- **Colgador hidráulico de lana**

Llenar la tubería con lodo cada 20 tubos de 7" y luego cada 10 barras de tubería de perforar de 4-1/2".

9. Faltando una barra (30 m) de tubería de perforar para llegar al zapato de los forros de 9-5/8" (2479 m), circular lodo durante 30 minutos para llenar completamente la tubería y evaluar cantidad y tipo de recortes que retornan en el lodo por la zaranda.
10. Si se observa restricción en la bajada de la lana en el hueco abierto (pérdida de peso de la tubería), se debería circular a dicha profundidad para remover del hueco los recortes que podrían haber quedado de la perforación o por motivo de la bajada de la tubería en el pozo.
11. Con la tubería en el fondo del pozo, circular durante 2 horas a **7.5 bpm** (2x80 spm) y acondicionar el fluido de perforación.

Colocar cabeza de cementar, soltar bola y sentar tubería corta de 7". La sarta de tubería quedaría como sigue:

<b>58 tubos nuevos de 7"-N80-29 lb/p-8 rd</b>	: 2379 m-3130 m
tope colgador de lana, 8rd	2379.0 m
landing collar, 8rd	3102.4 m
catcher sub , 8rd	3102.8 m
float collar, 8rd	3116.2 m
zapato brown, 8rd	3130.0 m

12. Probar líneas de superficie con 4000 psi. Continuar circulando a **7.5 bpm** (2x80 spm) durante **3 horas** más.

Las propiedades requeridas del lodo de perforación son

peso	: <b>10.0</b>	lb/gl
viscosidad plástica	: <b>16-18</b>	cp
punto cedente	: <b>8-10</b>	lbf/100 p <sup>2</sup>

caudal crítico (hueco 8.5"-tubería 7") : 7.2-8.2 bpm

**13. Realizar cementación bombeando los siguientes fluidos:**

**10 bl** agua con KCl (3 %)

**30 bl** Super Flush (30 bg + 27.5 bl agua)

**10 bl** agua con KCl (3 %)

**MEZCLA DE CEMENTO** (cantidad definitiva se determinará según el volumen integrado del hueco de los registros eléctricos)

**530 bg** cemento Andino tipo 5

**174 bg** Sílica Flour (35 %)

**747 lb** Halad-14 (1.5 %)

**100 lb** Dair-1 (0.2 %)

**1200 lb** KCl (5% x peso de agua)

peso	: 16.4 lb/gl
requer. agua	: 5.36 gl/bg
rendimiento	: 1.43 p <sup>3</sup> /bg
tiempo bomb.(BHCT=192°F)	: 4:58 hr:min
filtrado	: 198 cm <sup>3</sup> /30'
agua libre	: 0.00 %
esf. comp. 24 hr	: psi
reología 80°F	
600; 300; 200; 180 rpm	: +300; 200; 149; 139
100; 90; 60; 30 rpm	: 92; 85; 65; 39
reología 192°F	
600; 300; 200; 180 rpm	: 181; 91; 63; 59
100; 90; 60; 30 rpm	: 35; 30; 23; 15
volumen agua de mezcla	: 67.6 bl
volumen mezcla de cemento	: 135 bl

La simulación del trabajo de cementación se efectuará con el programa Cement Job Simulator.

**14.** Limpiar líneas de superficie con lodo hasta la cabeza de cementar. Soltar tapón pump down plug para tubería de perforar de 4-1/2" y desplazar mezcla de cemento con las bombas de Halliburton con 215 bl de lodo como sigue :

- **110 bl a 8 bpm**
- **18 bl a 4 bpm** (87 bl DP 5" y 41 bl DP 4-1/2")
- **70 bl a 8 bpm**
- **17 bl a 4 bpm** (87 bl en forros de 7")

Con el compupack y computador registrar: pesos de mezcla del RCM y de la línea de bombeo al pozo, caudales de bombeo, volumen de fluidos y presión. Comprobar llegada del tapón al landing collar con **500 psi más**.

**15. Desconectar setting tool, sacar dos tubos y efectuar circulación directa** (no reversa) de lodo con las bombas H-700B hasta que retorne todo el volumen de fluidos lavadores y exceso de cemento; sacar cañería.

**16. Esperar fraguado de cemento durante 30 horas.**

**17.** Bajar tubería con broca tricónica de 8-1/2" y canasta hasta el tope de cemento, limpiar cemento hasta el tope de lana de 7". Circular durante 3 horas y sacar cañería.

**18.** Bajar tubería con broca de 6" y canasta hasta el tope de lana, limpiar cemento y continuar bajando hasta el landing collar. Circular durante 3 horas y sacar cañería.

**19.** Bajar tubería con broca de 6" y rima hasta el landing collar, circular durante 3 horas y sacar cañería.

**20. Tomar registro CBL-VDL-GR** con fluido de perforación en el pozo. Sacar sondas.

**21.** Cerrar controles, **probar sello hidráulico del tope de la lana de 7" con 2000 psi.**

**22.** Bajar cañería con broca de 6" hasta el landing collar, efectuar cambio de lodo por fluido de completación según recomendación.

**23.** De acuerdo a resultados del registro CBL-VDL, se emitirá nueva recomendación.

## **OBSERVACIONES**

**1.** Para el cálculo de volumen de cemento se ha considerado:

- Diámetros promedio de hueco de 8.5" desde el fondo hasta el tope de Vivian (2741 m) y de 10" desde el tope de Vivian hasta el zapato de los forros 9-5/8" (2479 m); en ambos casos se considera 30% de exceso.
- Volumen de **30 bl de cemento por encima del tope de la lina de 7"**, que será retornado a superficie.

**2.** Se estima **1500 psi** en cabeza al final del desplazamiento de la mezcla (arriba de tapones al landing collar). La densidad equivalente de fondo es **12.0 lb/gl**.

**3.** Tiempo estimado para efectuar el trabajo de cementación y operación de circulación directa es **+/- 3 horas**.

**A. Salas**

**18/05/96**

